

Projet SIE
Master 3



**Définition d'indicateurs
de pollution diffuse d'origine agricole
pour le classement de bassins versant**

CHOLLET Quentin et LETENNEUR Delphine

Décembre 2012

Table des matières

I. INTRODUCTION.....	1
1. Problématique.....	1
2. Objectifs.....	1
3. Démarche.....	2
II. ACTIVITÉ AGRICOLE DU BASSIN VERSANT.....	3
1. Paramètres utilisés pour l'évaluation.....	3
a. Type de surface agricole.....	3
b. Drainage.....	7
c. Lavage des pulvérisateurs	7
d. Végétation riveraine (Ripisylve et Bande enherbée).....	8
2. Paramètres en discussion.....	10
3. Caractérisation de l'activité agricole du bassin versant - valable pour la période de mars à octobre.....	11
III. VULNÉRABILITÉ DU BASSIN VERSANT	12
1. Paramètres utilisés pour la classification.....	12
a. Topographie.....	12
b. Densité du réseau hydraulique.....	13
c. Forme du bassin versant.....	14
d. Hydrologie du bassin versant.....	16
e. Importance particulière en matière d'approvisionnement en eau potable.....	20
2. Paramètres en discussion.....	21
3. Évaluation de la vulnérabilité du bassin versant en fonction de ses caractéristiques propres.....	23
IV. RÉSULTATS : CLASSEMENT DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE DU BASSIN VERSANT	24
1. Matrice de croisement	24
2. Résultats pour les bassins versants de la Venoge et la Chamberonne	24
Classement des deux bassins versant tests :	25
.....	25
3. Résultats pour les deux bassins versant tests.....	26
V. VALIDATION DE LA MÉTHODE.....	29
1. Résultats et occupation du sol.....	29

2. Indice IGCH.....	30
3. « Qualité pesticides » - SESA.....	31
VI. CONCLUSION.....	33
VII. BIBLIOGRAPHIE.....	34
Textes législatifs.....	34
Littérature scientifique.....	34
Sites Internet.....	35
VIII. ANNEXES.....	36
1. Application des substances phytosanitaires selon la période.....	36
2. Catégories de la nomenclature de l'utilisation du sol 2004.....	37
3. Poids attribués aux substances selon la classification SIRIS	39
4. Pondération de chaque type de culture en fonction du poids des substances et de leur application.....	41
5. Schéma récapitulatif des données SIG disponibles et leur utilisation.....	43
6. 22'433 bassins versant de l'entier du territoire suisse (OFEV).....	44
7. Comparaison entre la prise en compte des pentes du bassin versant dans son intégralité et celles des surfaces agricoles	45
8. Méthode alternative pour l'évaluation de la composante hydrologique du bassin versant	47
9. Extrait de la carte pédologique du cadastre du canton de Vaud (Michel Gratier, communication personnelle)	51
10. Tableaux des résultats de la classification des bassins versant de la Chamberonne et de la Venoge.....	53
a. Résultats de la classification de l'activité agricole	53
b. Résultats de la classification de la vulnérabilité du bassin versant	55

Index des illustrations

Illustration 1: Démarche de la méthode de classification.....	2
Illustration 2: Arbre de classification des substances phytosanitaires selon l'EAWAG (Wittmer et al., 2012).....	5
Illustration 3: Vue d'ensemble de l'occupation (agrégée) du sol du bassin versant de la Venoge.....	6
Illustration 4: exemple de sélection pour le type de surface "Arboriculture"	6
Illustration 5: Description de la couverture des surfaces aux abords des tronçons de la Venoge (source : PAC Venoge).....	8
Illustration 6: Utilisation du sol sur une portion de la Venoge.....	9
Illustration 7: Points contenus dans la bande tampon de 50 m de part et d'autre du cours d'eau - Sélection des points de type "Forêt" (en bleu clair).....	9
Illustration 8: Pente moyenne des surfaces agricoles.....	13
Illustration 9: Pente moyenne de toutes les surfaces.....	13
Illustration 10: Distribution de fréquence de la longueur des tronçons des sous bassins versant de la Venoge.....	13
Illustration 11: Distribution de fréquence de la surface des sous bassins versant de la Venoge.	14
Illustration 12: Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme de crue	14
Illustration 13: Exemples de forme de bassins versant et la valeur de K correspondante	15
Illustration 14: Distribution de fréquence de la valeur du coefficient de Gravelius pour chaque sous bassins versant de la Venoge.....	15
Illustration 15: Valeur du coefficient de Gravelius pour chaque sous bassin versant de la Venoge.....	16
Illustration 16: Débit observé et débit de prévision de la Venoge avant son arrivée au lac (source : swissrivers.ch).....	17
Illustration 17: Modélisation RS 2012 de la Venoge (source : edric.ch).....	18
Illustration 18: Débits simulés à l'exutoire de la Venoge (source : e-dric).....	18
Illustration 19: Localisation des stations de mesures, leur bassin versant et la valeur de leur FFI (Siber, 2009).....	19
Illustration 20: FFI prédits pour l'ensemble des bassins versant du plateau.....	20
Illustration 21: Classes de qualité biologique des cours d'eau vaudois basées sur l'indice IBCH (2009/2010).....	30
Illustration 22: "Qualité pesticides" de la Venoge et la Chamberonne : 2002/2004 (Vioget & Strawczynski, 2005).....	31
Illustration 23: Q347 des bassins versant suisses (Atlas hydrologique de la suisse).....	48
Illustration 24: Délimitation des zones d'intensité égales pour la Suisse (SN 640 350).....	49

I. INTRODUCTION

1. Problématique

Les pressions anthropiques sur les ressources naturelles sont de plus en plus préoccupantes. En particulier, l'eau, ressource vitale, est sujette à diverses dégradations tant quantitatives que qualitatives.

En effet, les activités humaines, en particulier industrielles et agricoles, sont la source d'émissions diverses et les cours d'eau sont souvent les récepteurs et vecteurs des polluants émis.

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt va se porter plus précisément sur la problématique des pollutions agricoles diffuses. De nombreuses substances chimiques sont utilisées dans ce domaine pour lutter entre autres contre le développement de mauvaises herbes ou l'attaque par des ravageurs. Ainsi, ce sont en Suisse quelques 2'000 tonnes de produits phytosanitaires qui sont utilisées chaque année (OFS, 2012).

Ces substances, une fois appliquées, vont prendre différentes voies d'acheminement et peuvent, notamment, se retrouver dans les eaux de surface. Depuis quelques années d'ailleurs, ces substances sont régulièrement mesurées dans nos lacs et cours d'eau (Chèvre et al., 2003).

2. Objectifs

L'impact des activités agricoles sur les eaux de surface au niveau d'un bassin versant est très complexe à appréhender. Souvent, il est difficile d'avoir une évaluation préliminaire de l'état d'un bassin versant. Cela induit une carence dans l'établissement des priorités en matière d'action de protection.

Le manque de données disponibles pour chaque bassin versant et les nombreuses substances entrant en jeu compliquent la réalisation d'une analyse simple sur l'état d'un cours d'eau.

Ce manque de données justifie le besoin de développer une méthode permettant d'évaluer facilement, en première approche, la pression des activités agricoles sur un cours d'eau.

Cette démarche relativement simple, pourra alors permettre une meilleure classification des priorités de traitement et / ou d'action de protection au niveau des différents bassins versant suisses, en vue de faciliter la prise de décision des pouvoirs publics.

Les bassins versants de la Chamberonne et de la Venoge ont été utilisés comme bassins versant tests pour la mise en place de la démarche. La méthode d'évaluation est tout à fait applicable à l'ensemble des cours d'eau suisses, puisque les données destinées à réaliser une telle classification des bassins versant sont disponibles au niveau fédéral pour la plupart, cantonal pour certaines et local pour celles plus spécifiques.

D'autre part, cette étude s'inspire d'une directive existante dans le domaine de la protection des eaux : *Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication* (OFEFP, 2002).

3. Démarche

L'évaluation de la pollution diffuse d'origine agricole va se faire en plusieurs étapes (résumées dans l'illustration 1).

Deux aspects vont être pris en compte indépendamment l'un de l'autre :

- l'activité agricole du bassin versant (Tableau II.3. : Caractérisation de l'activité agricole du bassin versant - valable pour la période de mars à octobre)
- la vulnérabilité de ce bassin versant (Tableau III.3. : Évaluation de la vulnérabilité du bassin versant en fonction de ses caractéristiques propres)

Pour chaque aspect, différents paramètres sont pris en compte et suivant leurs caractéristiques, des points équivalents (PE) sont ajoutés ou retranchés¹. A la fin du calcul pour chaque tableau, on aboutit à une valeur totale de points : là, suivant le résultat, une distinction en trois classes est effectuée. Ce choix a été fait de façon à pouvoir être comparable à la majorité des classifications du système modulaire gradué.

Puis, ces résultats seront croisés selon une matrice de croisement donnant la classification finale du bassin versant étudié.

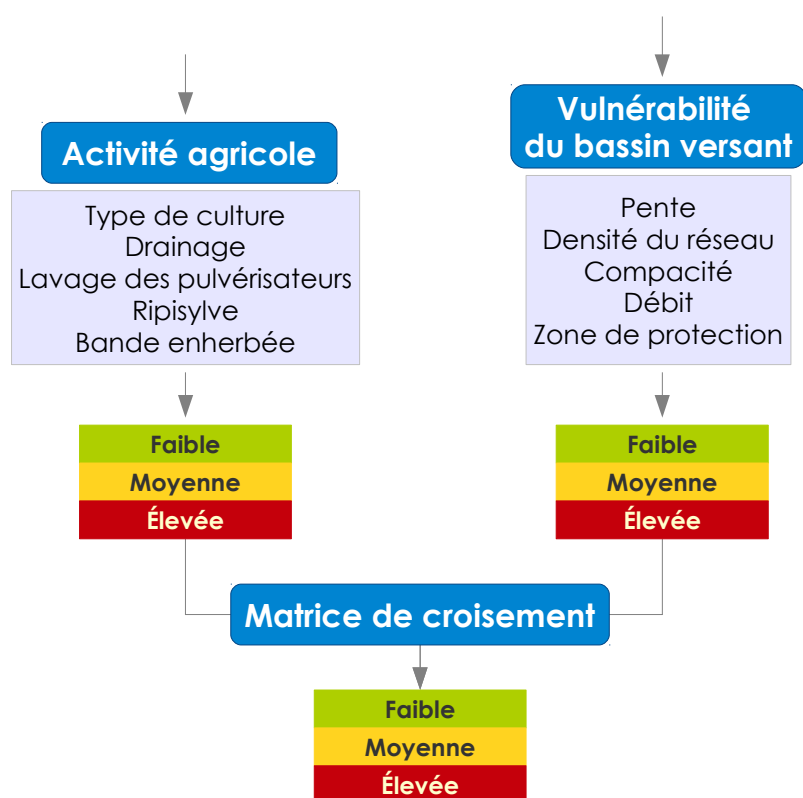


Illustration 1: Démarche de la méthode de classification

¹ L'utilisation de certains paramètres a été envisagée mais pour différentes raisons (manque de données, données pas assez renseignées, influence encore méconnue...), ils ont été évincés de la méthode. Ces paramètres seront tout de même décrits dans la deuxième partie de chaque chapitre.

II. ACTIVITÉ AGRICOLE DU BASSIN VERSANT

La caractérisation de l'activité agricole du bassin versant est la première étape nécessaire à l'évaluation des risques de pollution diffuse. La méthode repose sur l'appréciation de différents paramètres, dont les choix sont justifiés ci-dessous.

Notons également que la caractérisation de ces différents paramètres est valable pour la période d'application des substances phytosanitaires, soit de mars à octobre (voir Annexe 1.)

1. Paramètres utilisés pour l'évaluation

a. Type de surface agricole

L'un des paramètres le plus impactant pour la caractérisation des risques liés aux activités agricoles au niveau du bassin versant est le **pourcentage de surface agricole**.

La statistique suisse de la superficie² distingue différents types de surfaces agricoles, certaines sous-catégories ont été agrégées et **5 types** ont été conservés, à savoir les surfaces viticoles, horticoles, arboricoles, cultures fourragères et de plein champs et alpages.

En effet, il paraît utile de distinguer entre des cultures arboricoles et viticoles puisque les pratiques culturales sont relativement différentes, donc leur facteur de risque sera également différent. Par contre, pour les alpages et les cultures de plein champs, l'agrégation se justifie par une utilisation similaires des produits phytosanitaires.

Agriculture	200	Arboriculture, viticulture, horticulture	201	Arboriculture
			202	Viticulture
			203	Horticulture
			221	Terres arables au sens large
			222	Prairies naturelles au sens large
			223	Pâturages locaux au sens large
			241	Alpages fauchés au sens large
			242	Alpages pâturés au sens large
			243	Alpes à moutons au sens large
	220	Cultures fourragères et de plein champ		
	240	Alpages		

Tableau 1: Différenciation des types de surface agricoles selon l'OFS

Selon les types de surfaces agricoles, les **substances phytosanitaires** et les **quantités** appliquées vont différer. Ainsi, nous avons réalisé une pondération pour chaque type de surface agricole, selon ces deux caractéristiques.

En ce qui concerne l'évaluation de la priorisation des **substances** en elles-mêmes, différents systèmes de classification des produits phytosanitaires ont été testés. Celui qui a finalement été utilisé est basé sur la **méthode d'évaluation SIRIS** (Système d'Intégration des Risques par Interaction de Scores) :

² Pour plus de détails concernant la classification des autres types de surfaces de la nomenclature 2004 de l'utilisation du sol, se référer à l'Annexe 2.

« C'est une méthode d'agrégation multicritère qui sert d'aide à la décision en classant les substances actives phytosanitaires dans un ordre de risque décroissant d'atteindre les eaux, selon un procédé d'attribution d'un rang à chaque substance. [...] Le rang est attribué selon un nombre de critères défini jouant un rôle dans la mobilité ». (Gregorio, 2009)

Cette méthode de classification a été utilisée afin de dresser une liste des substances prioritaires dans le bassin versant lémanique (Copin, 2008).

Les critères d'exposition retenus sont les suivants : Quantité [kg], DT_{50} [jours], K_{oc} [cm³/g], Solubilité [mg/l], Hydrolyse [jour].

L'avantage de cette étude est qu'elle considère également des *critères d'effets* : les effets sur la santé humaine, en considérant le DJA (dose journalière admissible) et leur effet sur l'environnement, avec la PNEC (Predicted No-Effect Concentration).

Chacun des trois paramètres pris en compte (rang, $\log(DJA)$ et $-\log(PNEC)$) a d'abord été normalisé entre 0 et 100, puis la moyenne a été calculée. C'est cette moyenne qui fait office de « poids » spécifique à chaque substance, dont la liste est disponible en Annexe 3.

Notons que pour certaines substances, un seul des deux critères d'effet est significatif. Par exemple, le diflufenican présente un risque pour l'environnement ($-\log(PNEC) = -1.61$) mais pas pour la santé humaine (pas de valeur pour $\log(DJA)$). On dispose donc seulement de deux valeurs pour ce type de substances. La moyenne permet alors de prendre en compte très simplement le fait qu'un des deux critères d'effet n'est pas significatif, en réduisant le poids de la substance.

La pondération par type de culture est faite en prenant en compte les quantités de chaque substance appliquées par type de surface agricole, ces substances possédant elles-mêmes un poids spécifique déterminé précédemment.

Les **quantités appliquées** par type de cultures en Suisse ont été fournies par la CIPEL et sont issues de la base de données Pestibase. On dispose donc des quantités appliquées sur les surfaces arboricoles (62 substances), viticoles (65 substances) et sur les cultures de plein champs (103 substances)³.

Ces quantités ont été liées à la substance pondérée en question. Le poids de chaque substance a été normalisé entre 0 et 1 et multiplié par la quantité appliquée. On obtient un certain nombre de points pour chaque type de culture (voir Annexe 4.).

On obtient la pondération suivante :

	Points	Facteur de pondération (%)
Arboriculture	10,77	44
Viticulture	5,54	23
Plein champs	3,90	16
Horticulture	3,90	16
Alpage	0,25	1
Total	24,36	100

3 On fera dans la suite deux hypothèses : l'horticulture présente le même poids que la culture de plein champs et les alpages ont une contribution négligeable (1%).

Cette classification paraît cohérente dans le sens où l'arboriculture et la viticulture sont les deux types agricoles présentant les facteurs de pondération les plus importants. L'idée que ces cultures soient les plus significatives en matière de pollution diffuse agricole est aujourd'hui répandue et acceptée.

Cependant, on peut nuancer le fait que l'arboriculture présente un facteur de pondération valant presque le double de celui des vignes, d'autant plus que cette valeur élevée de pondération pour l'arboriculture est majoritairement due au poids d'une substance en particulier : le captane (voir Annexe 4.). Celle-ci est massivement appliquée sur les parcelles arboricoles, et bien que le poids de cette substance ne soit pas fondamentalement élevé, il joue un rôle important dans la pondération de ce type de culture.

Idéalement donc, cette méthode de pondération serait à valider avec des tests de terrain sur différents bassins versant, basés par exemple sur une comparaison de bassins à composante majoritairement arboricole par rapport à d'autres plutôt viticoles.

Remarque :

Une seconde classification des substances a été testée (Wittmer et al., 2012). Cette étude est menée par l'**EAWAG** et est toujours en cours. Le classement se fait ici selon deux critères : la mesure dans les eaux de surface de la substance en question et leur valeur de EC95 (95ème percentile de la concentration d'exposition). Quatre classes de substances sont alors déterminées selon l'arbre de classification suivant :

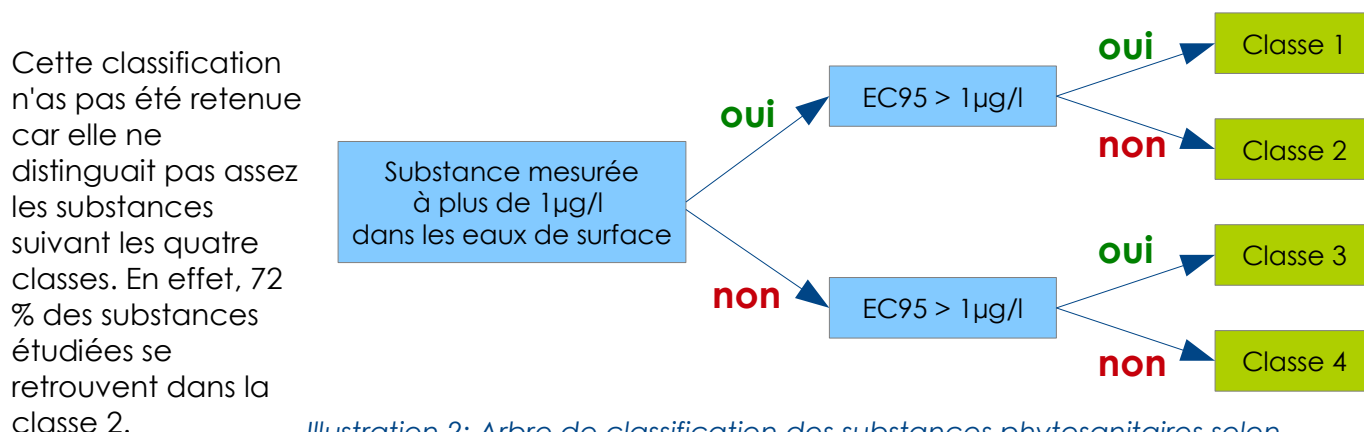


Illustration 2: Arbre de classification des substances phytosanitaires selon l'EAWAG (Wittmer et al., 2012)

On s'aperçoit alors que suivant la classification choisie, la liste des substances prioritaires va changer, de même que le poids attribué à chaque substance, et donc à chaque type de culture. Une tentative d'agrégation de différentes méthodes de classification est impossible, c'est pourquoi un choix doit être fait quant au système de classification à utiliser. Celui-ci se doit d'être validé et accepté par la communauté scientifique du domaine.

Exemple d'application

Dans un SIG⁴, à partir d'une simple couche d'utilisation du sol, en particulier ici la couche de classification NOLU04, on peut déterminer la part de chaque type de culture au sein d'un

4 L'ensemble des données SIG disponibles et leur utilisation sont résumées à l'Annexe 5.

bassin versant donné. La délimitation du bassin versant est elle-même issue d'une couche représentant l'entier du territoire suisse, et les 22'433 bassins versant qu'il contient (Annexe 6.).

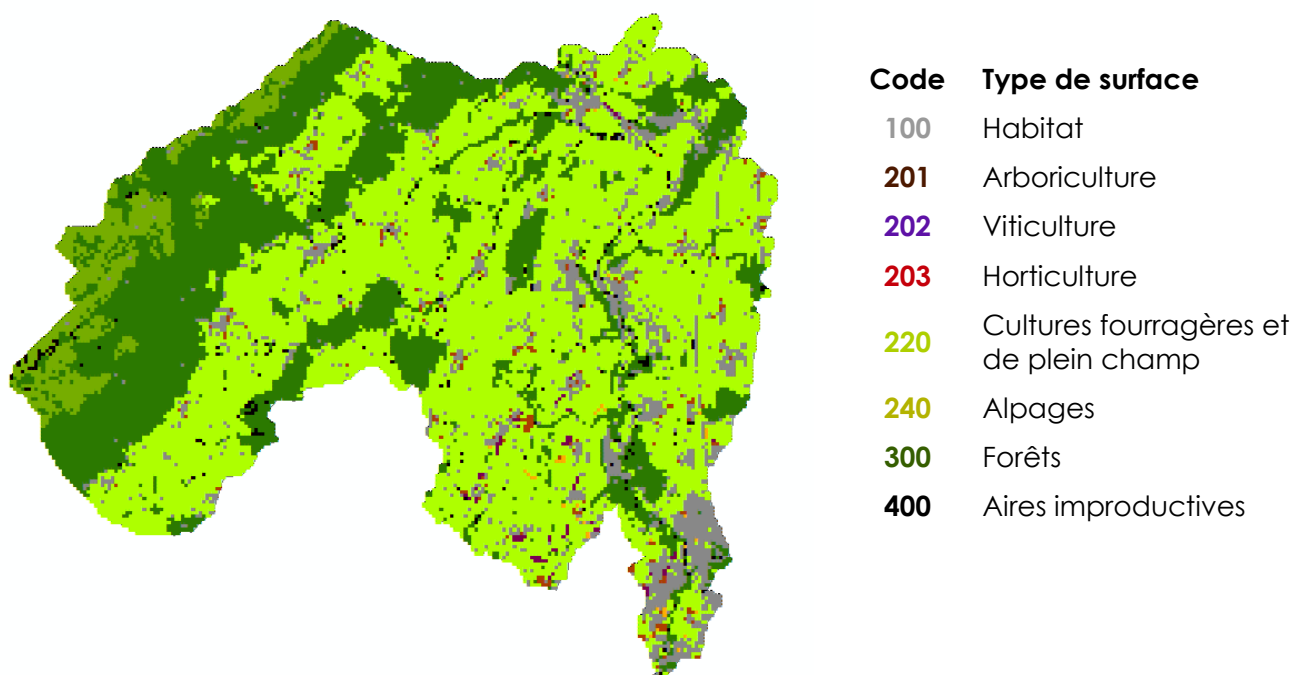


Illustration 3: Vue d'ensemble de l'occupation (agrégée) du sol du bassin versant de la Venoge

On sélectionne spécifiquement les points d'utilisation du sol qui sont inclus dans le bassin versant d'intérêt, dans l'exemple : la Venoge. Puis on lance 5 requêtes pour chaque catégorie d'utilisation agricole, comme ci-contre :

On obtient alors les résultats suivants :

Type de surface agricole	Code	Nombre de points	Part de la surface [%]
Arboriculture	201	207	0.87
Viticulture	202	78	0.33
Horticulture	203	42	0.18
Cultures fourragères et de plein champs	220	12'808	53.65
Alpages	240	1'162	4.87
Bassin versant total	-	23'874	100

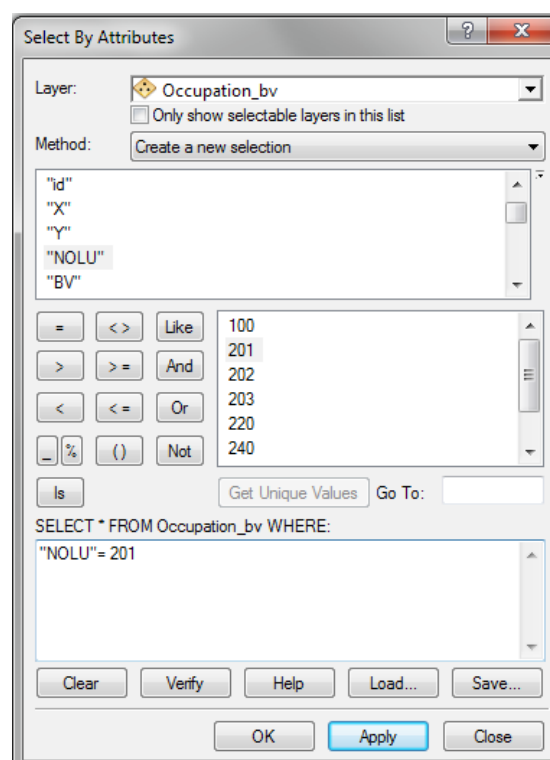


Illustration 4: exemple de sélection pour le type de surface "Arboriculture"

b. Drainage

Le deuxième paramètre à considérer dans la méthode d'évaluation est la part de **surface agricole drainée**. En effet, une parcelle drainée sur laquelle sont appliquées des substances phytosanitaires est plus vulnérable face aux pertes de ces substances dans les eaux de surface, le drainage facilitant leur acheminement direct vers les eaux de surface.

La classification prenant en compte la **part de la SAU (Surface Agricole Utile⁵)** drainée, est reprise de la méthode ARPEGES (Gauroy et al., 2012) développé en France par l'Onema (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques).

Le système d'attribution des points a été déterminé en première approche ici : une réflexion plus poussée doit être menée afin de déterminer plus rigoureusement la contribution attendue d'un système de drainage sur les risques de pollution diffuse des eaux de surface.

Exemple d'application

Les informations relatives à la part de SAU drainée sont issues d'un rapport réalisé par l'OFAG sur l'état du drainage en Suisse (Béguin, 2008). Des chiffres sur la part de la SAU drainée par canton sont disponibles. En cas d'absence de données de terrain propre à chaque bassin versant, la moyenne cantonale peut donc être tirée de ce rapport.

Pour l'exemple de la Venoge, la valeur moyenne pour le canton de Vaud a été utilisée. Elle est de 42,6%.

c. Lavage des pulvérisateurs

L'impact des activités agricoles peut être réduit au moyen d'un **rinçage approprié des pulvérisateurs**, comme c'est le cas par exemple pour l'installation pilote implantée pour le Boiron de Morges (VD). Les restes de produits phytosanitaires sont récupérés afin d'être traités convenablement, et ne risquent donc pas d'être rejetés au-dessus d'une grille d'eaux pluviales ou ailleurs dans l'environnement.

Exemple d'application

L'information relative à la présence d'une installation de lavage des pulvérisateurs est disponible auprès des autorités et acteurs dans le domaine agricole d'un bassin versant donné.

Pour l'exemple présent de la Venoge, aucune installation centralisée du type de celle du Boiron de Morges n'est en place.

5 Notons que la SAU ne prends pas en compte les surfaces d'alpages

d. Végétation riveraine (Ripisylve et Bande enherbée)

La prise en compte de la présence de végétation riveraine se distingue en deux considérations : la forêt présente aux abords du cours d'eau (la ripisylve) et la présence d'une bande tampon enherbée.

Tout d'abord, la possibilité pour les pesticides d'atteindre les eaux de surface est réduite par la **présence de forêt** entre la zone d'application (parcelle agricole) et le cours d'eau le plus proche. Ainsi, l'évaluation du pourcentage de la surface de ripisylve présente dans une bande de 50 m autour du réseau hydraulique, peut permettre de déterminer la réduction de l'impact des activités agricoles. Ainsi, un abattement du nombre de points est accordé dès lors que la surface de forêt est supérieure à 50% dans cette bande tampon de 50 m de part et d'autre du cours d'eau.

Le choix de ce paramètre est inspiré de la méthode ARPEGES développé par l'Onema.

Ensuite, dans cette même bande tampon, si la surface restante (sans forêt) est **enherbée**, alors un nouvel abattement est effectif. Cette information est facultative : si une telle information est disponible sur un bassin versant donné, alors on peut l'exploiter.

Par exemple, si au sein d'un bassin donné certaines prescriptions en matière de bandes enherbées (soit pour compléter, soit en lieu et place de ripisylves) sont édictées, alors on considérera ces informations locales.

Exemple d'application

Les informations concernant la surface de forêt et de bande enherbée peuvent être tirées d'un SIG. En effet, possédant une couche représentant le réseau hydraulique, il suffit d'appliquer un « buffer » de 50 m de part et d'autre des cours d'eau et de lancer une première requête sur la surface de forêt (code : 300).

Cependant, selon la couche d'utilisation du sol, la résolution des points de la statistiques suisse de la superficie étant de 100 m, il se peut que le résultat ne corresponde pas vraiment à la réalité du terrain. Ainsi, il faut prendre en compte les spécificités locales au cas par cas, si des informations de terrains plus précises sont disponibles.

Par exemple, le plan de protection de la Venoge donne des informations plus précises sur la couverture des surfaces aux abords des tronçons (voir Illustration 5).

La ripisylve est donc présente dans ce cas sur plus de 50% de la longueur du cours d'eau.

	Longueur de cours d'eau (km)			Total
	tronçons bordés de forêts (d'après Vector 25)	tronçons bordés de cordons boisés étroits (non compris dans Vector 25)	tronçons hors plan de gestion (zones alluviales, tronçons enterrés, tronçons canalisés sans boisés)	
Cours d'eau de la Venoge, à l'aval de la confluence	18,6	1,2	9,2	29
Cours d'eau de la Venoge, à l'amont de la confluence	10,8	12,9	0,0	24
Cours d'eau du Veyron	17,5	1,7	5,3	25
TOTAL périmètre	47	16	15	77

Illustration 5: Description de la couverture des surfaces aux abords des tronçons de la Venoge (source : PAC Venoge)

Le calcul de la surface de ripisylve dans une zone tampon de 50 m de part et d'autre du cours d'eau peut, en cas d'absence de données locales, se calculer via un SIG, malgré le fait que la couche de la statistique suisse présente une résolution insuffisante (100 m) pour une analyse d'une résolution de 50 m.

En effet, disposant de la couche d'utilisation du sol et du réseau hydrologique du bassin versant d'étude, on peut appliquer un buffer de 50 m autour des tronçons de cours d'eau, puis y sélectionner spécifiquement les points de type « Forêt » (code 300).

La résolution est insuffisante dans le sens où, suivant la configuration du cours d'eau par rapport à la grille d'occupation du sol, certains points ne seront pas « captés » par le buffer de 50 m (voir Illustration ci-dessous). Cependant, en l'absence de données locales plus précises, cette méthode s'avère une bonne alternative. En effet, l'observation montre que les points de forêts sont le plus souvent agrégés en clusters, formant des groupes de points observables sous forme de taches vertes sur les cartes d'occupation du sol. La résolution accessible pour l'occupation du sol étant de 100 m, prendre un buffer de 50 m de chaque côté de la rivière garanti de prendre au minimum un point, voire deux. Ainsi, si une forêt est traversée, sa présence sera observée et prise en compte. Même si cette méthode contient encore une certaine imprécision, il est raisonnable de supposer que sur la longueur totale du tracé, la précision obtenue est largement suffisante pour le but de cette étude. Pour un travail plus approfondi, il est possible d'augmenter la résolution, au prix d'une augmentation des temps de calculs.

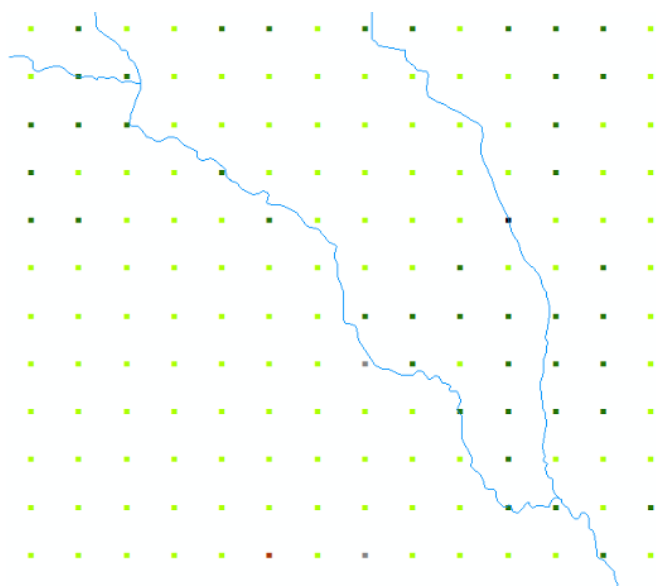


Illustration 6: Utilisation du sol sur une portion de la Venoge

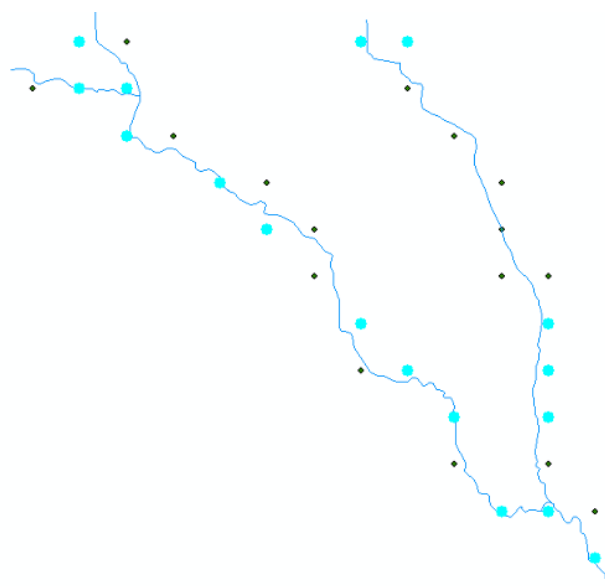


Illustration 7: Points contenus dans la bande tampon de 50 m de part et d'autre du cours d'eau - Sélection des points de type "Forêt" (en bleu clair)

2. Paramètres en discussion

L'utilisation de certains autres paramètres a été envisagée, mais finalement rejetée, du fait du manque de données relatives ou de l'imprécision concernant les risques réels en termes de pollution diffuse des eaux de surface.

Tout d'abord, la **méthode d'application** des produits phytosanitaires avait été considérée. En effet, selon la manière d'appliquer la substance en question, son devenir dans l'environnement peut varier. Par exemple, dans le cas d'une application par pulvérisation, les pertes par dispersion dans l'air sont importantes (INRA, 2005) : jusqu'à 20 à 30% des produits peuvent être perdus dans l'air sous forme de gouttelettes ou de gaz (Van Den Berg *et al.*, 1999). Ces pertes sont alors transportées par les vents et déposées plus loin : c'est l'effet du « drift », responsable d'une pollution des eaux de surface.

Ainsi, une péjoration peut être envisagée dans le cas où plus d'un certain pourcentage des applications est fait par pulvérisation.

On peut alors se questionner sur l'impact de ce drift sur les eaux de surface d'un bassin versant, puisque ce phénomène est actuellement très délicat à appréhender, dépendant de très nombreux paramètres : on peut citer la taille des gouttelettes appliquées, la présence d'adjuvants dans le produit, le vent, la stabilité atmosphérique...(INRA, 2005).

De plus, les données pour un bassin versant d'étude sont extrêmement difficiles, voir impossibles à obtenir

Pour ces raisons, ce paramètre « méthode d'application » des substances phytosanitaires n'a pas été considéré dans la méthode.

Ensuite, le **nombre d'application** influence aussi sûrement les chances de retrouver les pesticides dans l'eau de surface. Cependant, à ce stade, il semble difficile de lier les risques à la fréquence et au nombre d'application.

En effet, il n'est pas possible de déterminer sur une longue période et sur un espace tel qu'un bassin versant, s'il est plus impactant, par exemple, d'être face à une parcelle recevant une seule application en début de croissance ou une autre recevant de multiples applications, tout au long de la période de culture. Trop de paramètres entrent en ligne de compte ici : par exemple les quantités appliquées pour chaque application, le temps s'écoulant entre l'application et la pluie suivant cette application...

Le niveau de détail de ces considérations n'est pas compatible avec l'évaluation globale que nous souhaitons développer dans cette méthode.

3. Caractérisation de l'activité agricole du bassin versant - valable pour la période de mars à octobre

Dans cette partie, les données sont celles correspondant à la période principale d'application des produits phytosanitaires, s'étendant de mars à octobre.

Facteur d'application	Critère d'évaluation	Points
Type de surface agricole		
Type de culture [% du bassin versant] (Pondération selon substances appliquées, classement SIRIS)	201 - Arboriculture	PE = % BV *0.44
	202 - Viticulture	PE = % BV *0.23
	203 - Horticulture	PE = % BV *0.16
	220 - Cultures fourragères et de plein champs	PE = % BV *0.16
	240 - Alpage	PE = % BV *0.01
Surface agricole drainée		
Part de la SAU drainée [%] SAU = surfaces agricoles sans alpages	< 5	+ 0 PE
	Entre 5 et 20	+ 2 PE
	> 20	+ 4 PE
Mesure de protection		
Installation de lavage des pulvérisateurs		- 2 PE
Protection naturelle du cours d'eau		
Ripisylve : > 50 % de surface de forêt 50m autour du cours d'eau		- 3 PE
Surface bande enherbée présente autour du cours d'eau		- 1 PE
Somme =		...
Classement de l'activité		
Faible		< 10
Moyenne		10 - 15
Élevée		> 15

La détermination des seuils de chaque catégorie est basée sur une observation de la gamme des valeurs obtenues à la fin de l'attribution des points pour les deux bassins versant tests, dont les tableaux de résultats sont disponibles en Annexe 10.

La présente méthode a pour objectif principal de développer un concept de classification des bassins versant.

Le système d'attribution des points est provisoire et donné à titre d'exemple.

Il doit être affiné et discuté plus précisément entre experts du domaine au cours d'une étude approfondie.

III. VULNÉRABILITÉ DU BASSIN VERSANT

Cette deuxième partie s'attarde sur les paramètres propres aux caractéristiques du bassin versant ayant des conséquences sur sa vulnérabilité face au risque de pollution diffuse. Ces indicateurs sont de natures principalement topographique et hydrologique.

1. Paramètres utilisés pour la classification

a. Topographie

Tout d'abord, la **pente des surfaces agricoles** étudiées est un critère prépondérant à prendre en compte dans une telle appréciation. Celle-ci va en effet jouer un rôle important dans le processus de ruissellement des eaux. Bien entendu, ce n'est pas le seul paramètre à entrer en ligne de compte pour la caractérisation du ruissellement, mais en général, on peut estimer que plus une parcelle présente une pente forte, plus le transfert des eaux issues des précipitations vers le cours d'eau sera important. Aussi, la rapidité de ces transferts accentue le risque de pollution puisque la dégradation progressive des substances dans le sol est alors inexistante.

Il est important de considérer la pente moyenne des surfaces agricoles et non la pente moyenne sur tout le bassin versant. En effet, en général, les activités agricoles se font sur des parcelles qui s'y prêtent : celles présentant une pente faible. En considérant les pentes de l'entier du bassin versant, on surestime les valeurs de ces pentes et on pèjore de façon exagérée le score du bassin versant en question (voir l'Annexe 7.).

On retrouve la prise en compte de ce paramètre « pente » dans la plupart des modèles développés pour caractériser les impacts des activités agricoles sur les eaux de surface : ARPEGES (Gauroy, 2012), TRANSPEST 16 (Ineris-Cemagref, 2006), (Siber, 2006).

Idéalement, d'autres paramètres traduisant la rapidité et l'efficacité du ruissellement jusqu'au cours d'eau seraient également à prendre en compte : ce sont notamment le sens du travail du sol (si les rangs de cultures sont perpendiculaires ou non à la pente) et la forme de la pente : si elle est concave ou convexe (Mercier, 2013). Seulement, ces paramètres présentent un niveau de détail assez poussé, impliquant une difficulté d'acquisition des données, puisque qu'il faut quasiment raisonner à l'échelle de la parcelle. Ces deux paramètres ne seront donc pas considérés à l'échelle de la méthode actuelle, mais seraient à prendre en compte si l'on veut une meilleure précision dans l'échelle spatiale.

Exemple d'application

A partir du Modèle Numérique de Terrain Swiss Alti 3D, le calcul de la pente moyenne des surfaces agricoles sur le bassin versant de la Venoge donne une valeur de 4.92%. Notons que celle-ci valait 6.96% en considérant l'entier du bassin versant.

Les illustrations suivantes présentent une comparaison des valeurs moyennes des pentes des sous bassins versant de la Venoge, avec l'un ou l'autre des calculs :

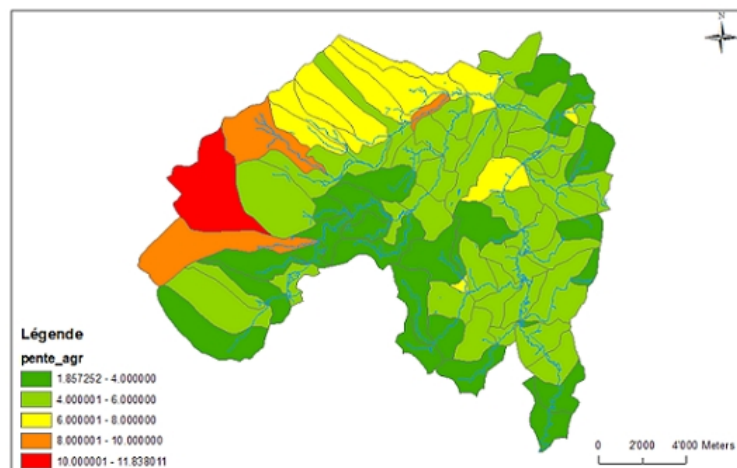


Illustration 8: Pente moyenne des surfaces agricoles

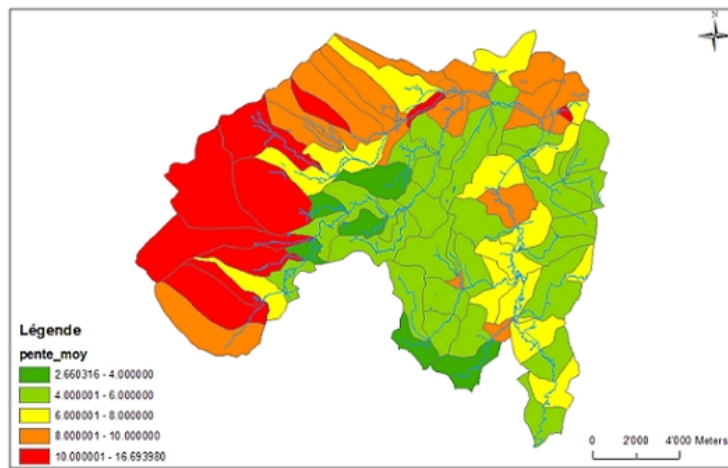


Illustration 9: Pente moyenne de toutes les surfaces

b. Densité du réseau hydraulique

Aussi, la **densité du réseau hydraulique** a été évaluée afin de déterminer la susceptibilité du cours d'eau à recevoir les eaux de ruissellement. Cela se justifie par le fait que plus un bassin versant présente un réseau hydraulique dense, plus la distance cours d'eau/parcelles agricoles est faible. Ainsi, étant à proximité directe des lieux d'application de produits phytosanitaires, les cours d'eau sont alors plus touchés par les transferts dans leurs eaux.

Les seuils de classifications sont tirés de la méthode ARPEGES, et la densité du réseau hydraulique s'exprime en km de cours d'eau par km² de bassin versant. La valeur est alors très simple à calculer : dans le SIG, la couche représentant le réseau hydraulique peut nous fournir la longueur totale des tronçons du cours d'eau d'intérêt. De même, la couche des bassins versant nous informe sur la valeur de l'aire de l'entier du bassin considéré.

Exemple d'application

Pour une longueur de 215.2 km et une surface de bassin versant de 238.8 km², la Venoge présente une densité de réseau hydraulique de 0.901 km / km².

La répartition de la longueur et de la taille des sous-bassins versant de la Venoge est la suivante :

Illustration 10: Distribution de fréquence de la longueur des tronçons des sous bassins versant de la Venoge

Longueur des tronçons [m]	
Minimum	2.6
Maximum	5'566
Somme	215'192
Moyenne	383.6
Écart type	553.0

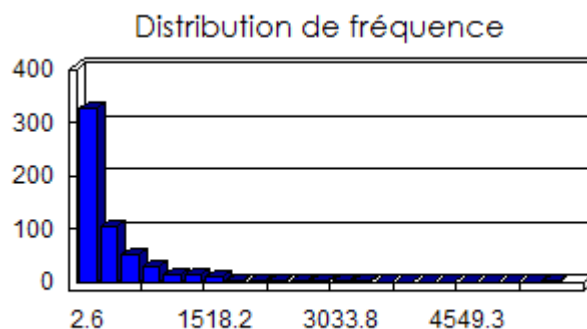
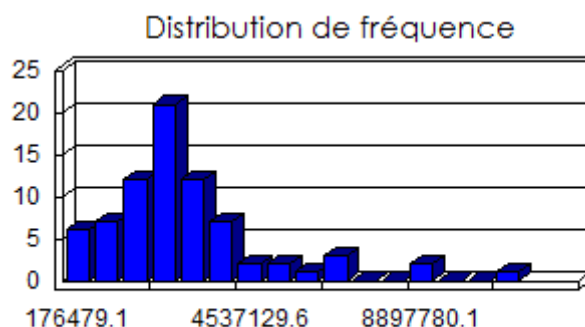


Illustration 11: Distribution de fréquence de la surface des sous bassins versant de la Venoge

Surface des sous bassins versant [m ²]	
Minimum	176'479
Maximum	11'359'146
Somme	242'636'403
Moyenne	3'192'584
Ecart type	2'045'593



Pour chaque sous bassin versant, on a donc la valeur de la longueur des tronçons qu'il contient, puis la valeur de son aire. Le quotient de ces deux chiffres donne la densité du réseau hydraulique pour chacun des sous bassin versant.

c. Forme du bassin versant

Le deuxième paramètre touchant à la morphologie du réseau hydraulique est la **forme du bassin versant**. Selon que le bassin versant présente une forme plutôt ronde ou plutôt elliptique, la réponse à l'exutoire de ce bassin va être différente (voir Illustration 12).

Un bassin versant de forme allongée va induire un lissage des débits de crue à l'exutoire.

Pour un bassin versant de forme plutôt ronde, le pic est beaucoup plus prononcé puisque les temps de concentration de chaque sous bassin versant vont présenter une valeur similaire. Ainsi, les pics de débits des différents affluents du cours d'eau principal se produisent de façon presque quasi simultanée à l'exutoire, induisant une forte valeur de débit sur une courte durée.

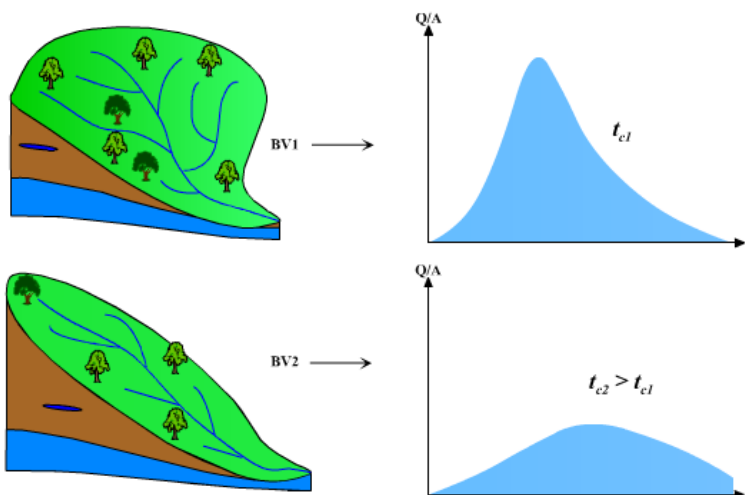


Illustration 12: Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme de crue

De nombreux indicateurs tentent de caractériser la forme d'un bassin versant. (<http://echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>)

Le choix s'est porté sur celui étant le plus simple à mettre en place dans le cadre d'une telle évaluation, et présentant l'interprétation la plus intuitive possible.

Cet indicateur est le **coefficient de Gravelius** $G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A}$ (ou indice de compacité). Sur

l'illustration 13, on peut voir quelle va être grossièrement la variation de forme suivant les valeurs du K de Gravelius.

Globalement, la concentration des polluants présents dans les eaux, suivent l'hydrogramme de crues.

On a donc dans cette évaluation, fixé une valeur seuil à 1.25 afin de distinguer grossièrement deux types de bassins versant.

Lorsque $K < 1.5$, la réponse hydrologique du bassin va présenter un pic caractéristique des bassins versants compacts. Dans les eaux de tels bassins, on va donc être face à une forte concentration de produits phytosanitaires pendant un temps relativement court, le temps que le pic se résorbe.

Ces fortes concentrations ponctuelles peuvent avoir un impact dommageable sur les organismes aquatiques : elles induisent un stress hydraulique pendant un laps de temps limité.

Par contre, pour les bassins versant où $K > 1.5$, le pic va être lissé, les concentrations seront donc moins importantes, mais seront présentes pour un temps plus long dans le cours d'eau. Du point de vue toxicité, ce cas là est plus dommageable. C'est pourquoi il a été décidé d'attribuer une péjoration dès lors que l'on est face à un bassin versant présentant une telle valeur de coefficient de Gravelius.

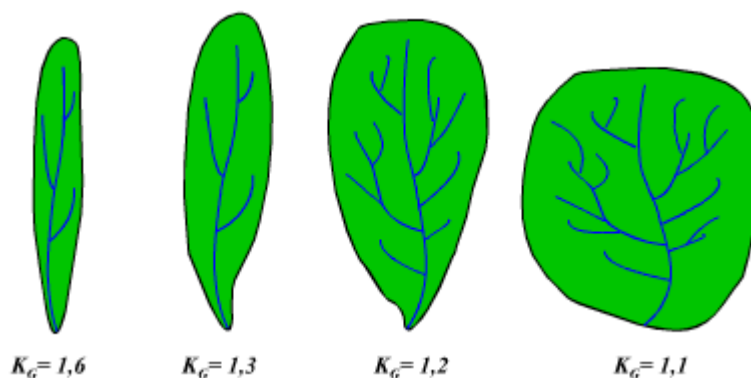


Illustration 13: Exemples de forme de bassins versant et la valeur de K correspondante

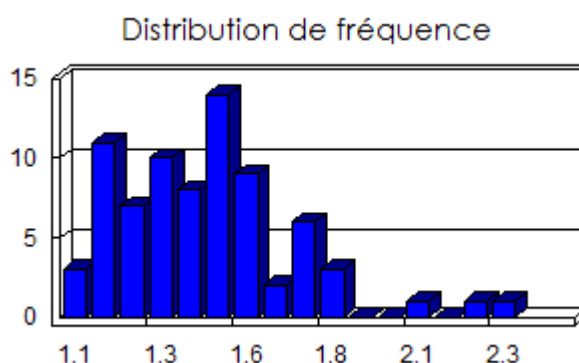
(<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>)

Exemple d'application

Pour le bassin versant de la Venoge, le calcul du coefficient de Gravelius pour chaque sous bassin versant donne la fréquence de répartition suivante :

Illustration 14: Distribution de fréquence de la valeur du coefficient de Gravelius pour chaque sous bassins versant de la Venoge

Coefficient de Gravelius	
Minimum	1.09
Maximum	2.37
Somme	114.28
Moyenne	1.50
Ecart type	0.25



Sur la carte thématique du résultat, on peut assez bien comparer les valeurs du coefficient de Gravelius par rapport à la forme de chaque sous bassin versant :

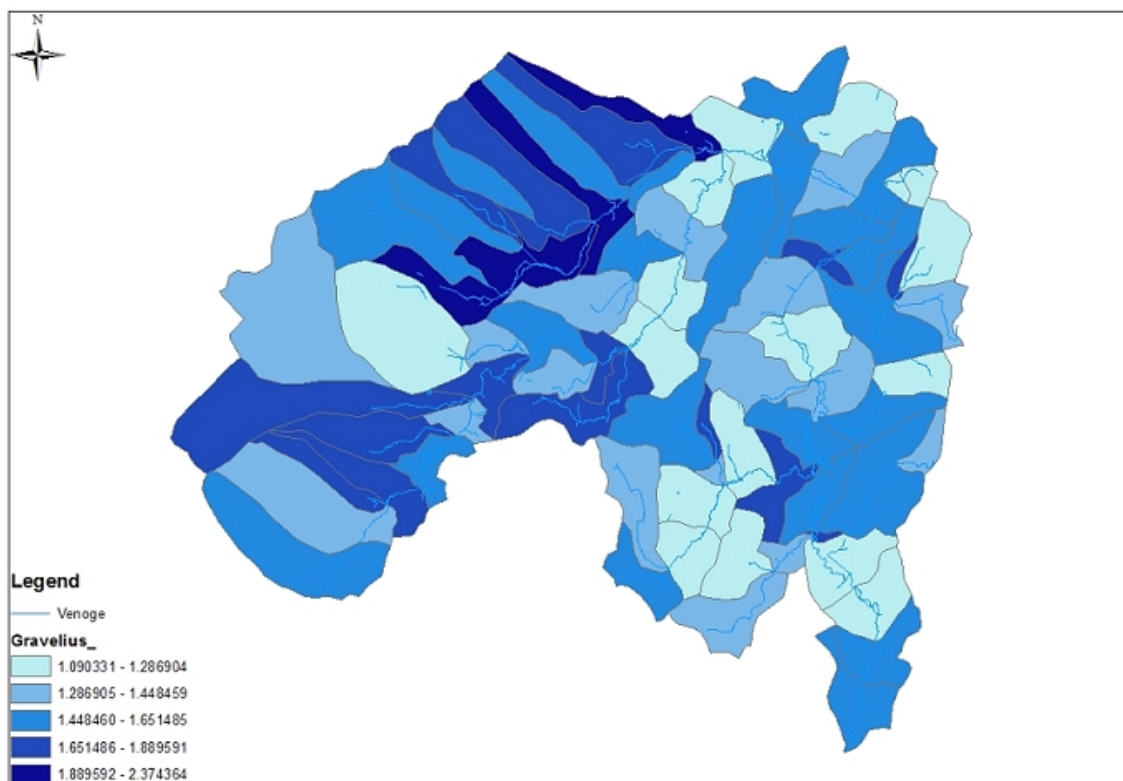


Illustration 15: Valeur du coefficient de Gravelius pour chaque sous bassin versant de la Venoge

d. Hydrologie du bassin versant

Le dernier paramètre à prendre en compte dans cette analyse est l'hydrologie du bassin versant. En particulier, on s'intéresse à la relation entre le débit de base (Q_{base}) et le débit d'orage (Q_{storm}) du cours d'eau.

La pertinence de cette approche réside dans le fait qu'elle considère directement la réponse hydrologique du bassin versant aux précipitations qu'il reçoit. Elle est donc plus rigoureuse que les approches considérant uniquement les précipitations, comme souvent dans les systèmes de classification. Par exemple, ARPEGES utilise le cumul des précipitations mensuelles sur les deux périodes considérées dans cette même étude.

Cette méthode est possible si l'on dispose des données nécessaires, à savoir les débits en continu d'un cours d'eau donné, durant la période d'application des pesticides, de mars à octobre. Ces données peuvent être obtenues par simulation : par exemple, Swissrivers, outils développé par le bureau E-dric permet de traiter la problématique des débits par bassin versant au niveau de la Suisse. Sur l'illustration 16, on peut voir quel type de résultat on peut facilement obtenir, directement en ligne depuis le site internet swissrivers.ch.

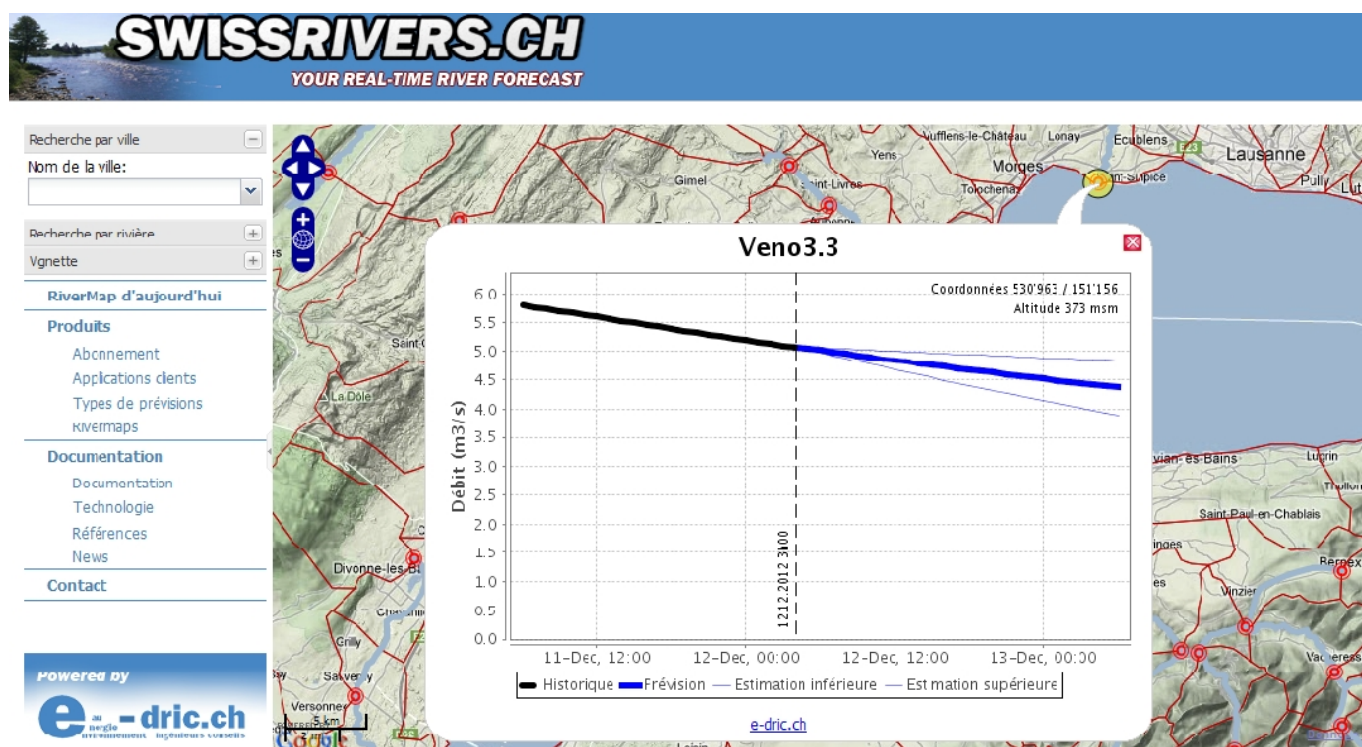


Illustration 16: Débit observé et débit de prévision de la Venoge avant son arrivée au lac (source : swissrivers.ch)

Grâce à la simulation pluie-débit RS 2012, il est également possible de disposer de la distinction entre les débits de base et d'orage au niveau d'un bassin versant. L'idée est alors de se baser sur un paramètre utilisé dans une autre étude sur l'évaluation des risques de pollution des eaux de surface (Siber, 2009). Elle s'intéresse plus particulièrement aux herbicides sur le Plateau Suisse et considère le FFI (Fast Flow Index), défini par :

$$FFI = 1 - BFI = \frac{Q_{tot} - Q_{base}}{Q_{tot}} = \frac{Q_{storm}}{Q_{tot}}$$

La pondération attribuée est d'autant plus importante que le FFI est grand : en effet, cela implique une forte contribution des eaux de précipitations, celles-ci étant les plus à même de ruisseler à travers les surfaces agricoles et se charger en substances phytosanitaires.

Une autre méthode a été proposée dans le cas où les débits de base et d'orage en continu n'étaient pas disponibles. Cette méthode est basée notamment sur les précipitations et le rapport entre les eaux issues du ruissellement des parcelles agricoles et le Q_{347} du cours d'eau. Elle est présentée en Annexe 8.

Exemple d'application

Selon la simulation des débits de la Venoge, dont la modélisation RS 2012 est visible sur l'illustration 17, on peut calculer le FFI pour ce cours d'eau, grâce à la simulation de quatre années de précipitations (visible à l'illustration 18) : on trouve alors $FFI = 0.5696$

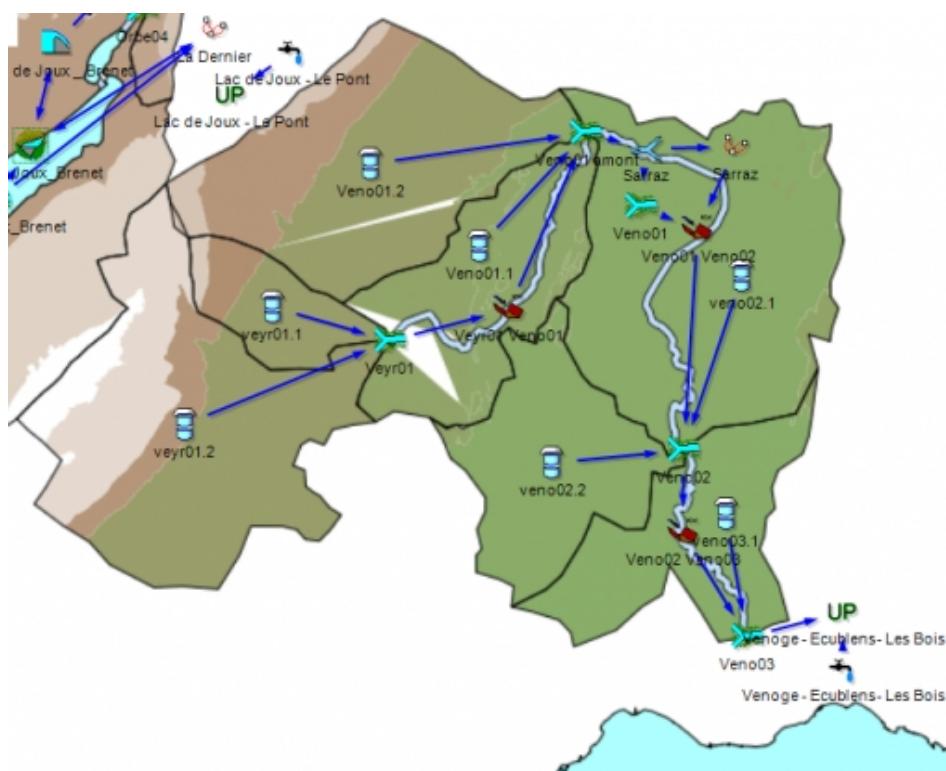


Illustration 17: Modélisation RS 2012 de la Venoge (source : edric.ch)

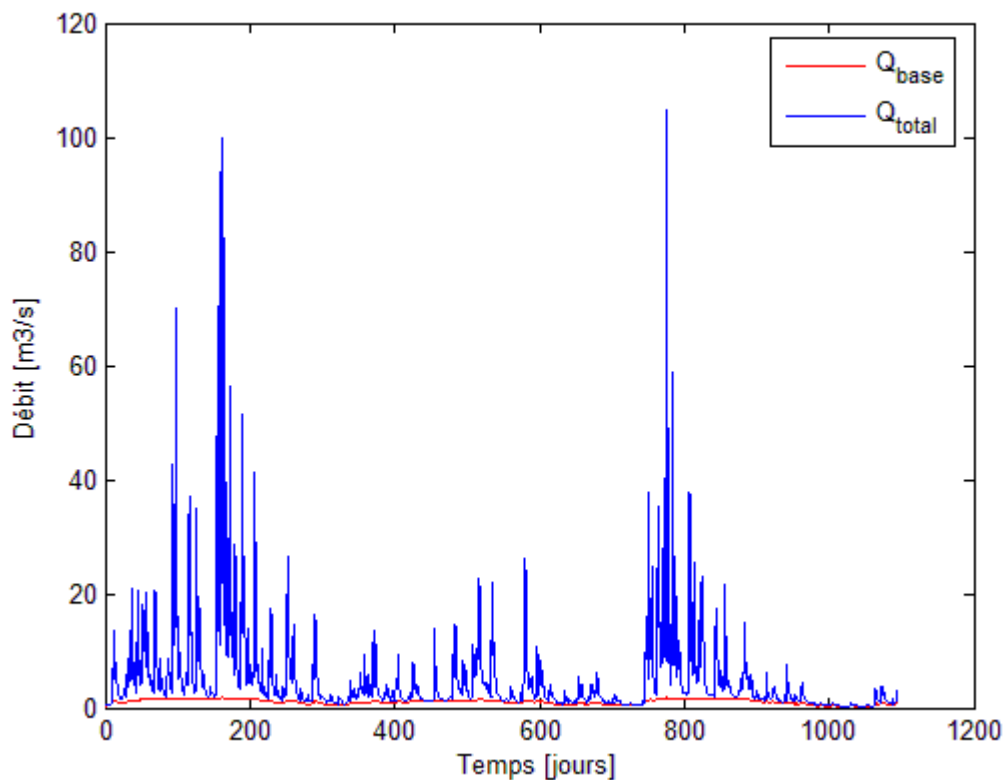


Illustration 18: Débits simulés à l'exutoire de la Venoge (source : e-dric)

La données simulées sur quatre ans par e-dric sont celles concernant la Venoge. Pour la Chamberonne l'information a été reprise de l'étude sur laquelle l'utilisation du FFI est inspirée (Siber, 2009).

Le FFI pour quelques bassins versants du Plateau suisse a été calculé (Illustration 19) et une interpolation a permis de déterminer les valeurs sur l'ensemble des bassins versants (Illustration 20).

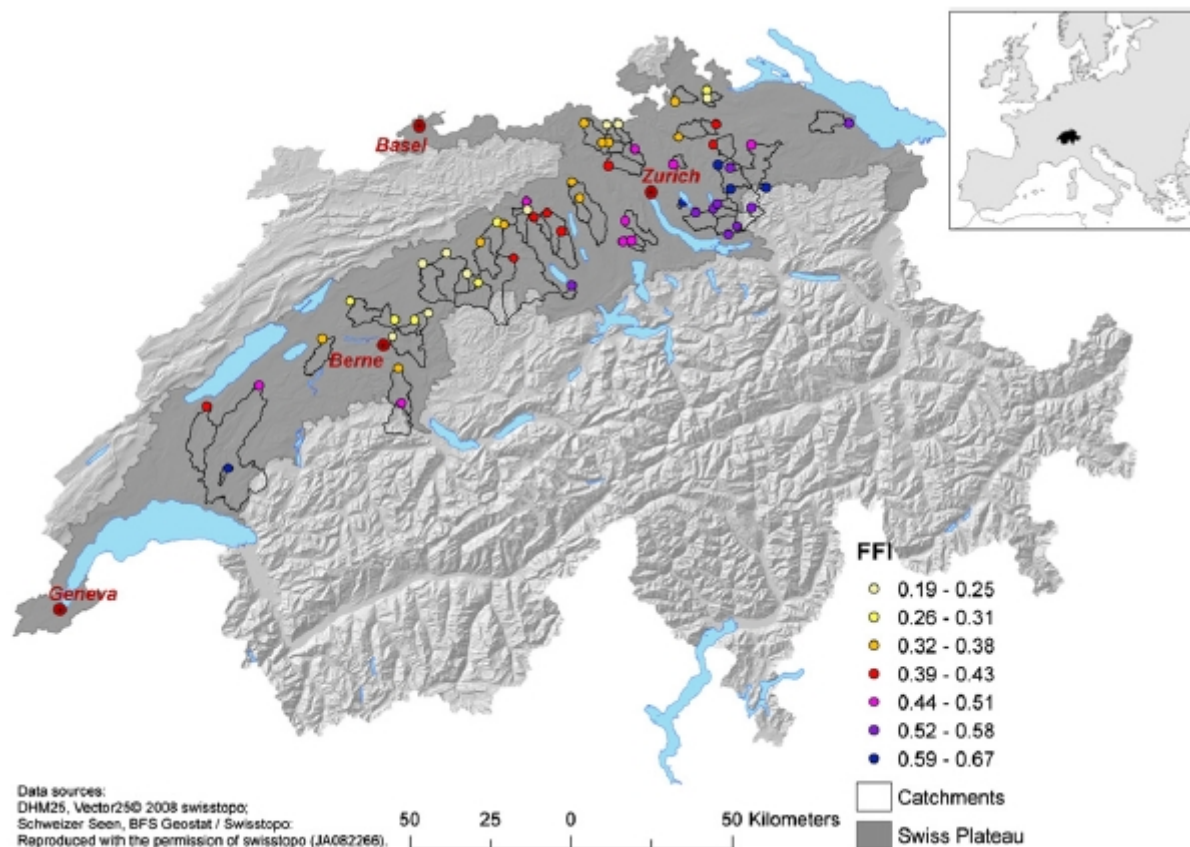


Illustration 19: Localisation des stations de mesures, leur bassin versant et la valeur de leur FFI (Siber, 2009)

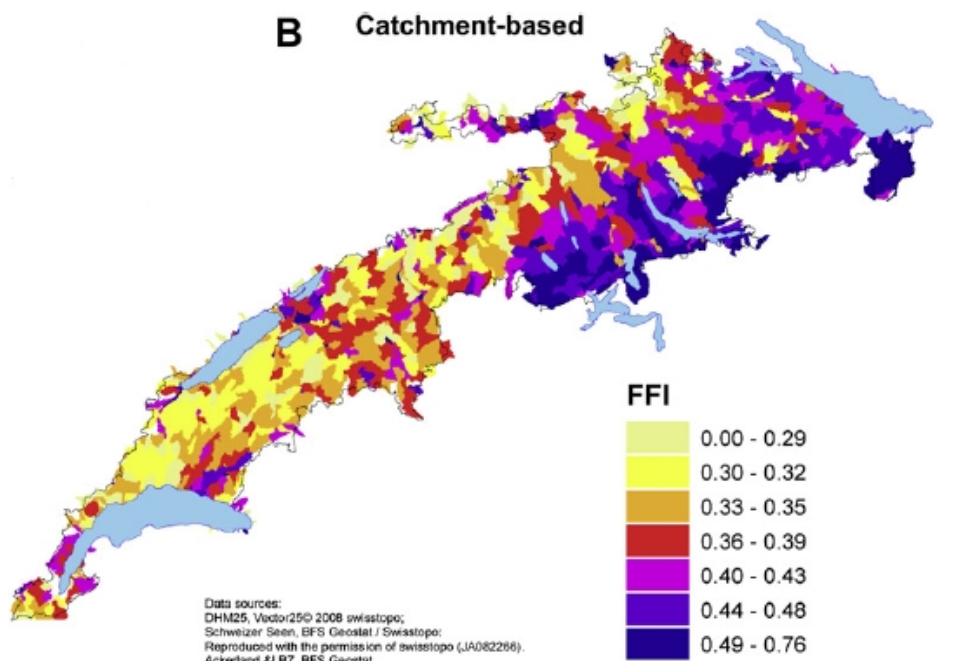


Illustration 20: FFI prédits pour l'ensemble des bassins versant du plateau

De cette carte, on peut tirer les valeurs interpolées pour la Chamberonne : le FFI vaut entre 0.00 et 0.29. On prendra 0.20 à titre d'exemple.

Notons également que la valeur du FFI de la Venoge selon cette étude vaut entre 0.33 et 0.35, ce qui est largement en dessous de la valeur déterminée par simulation des données sur quatre ans. On peut expliquer cette différence par le fait que la valeur a été interpolée et il en résulte inévitablement des erreurs. De même, il serait intéressant de simuler les débits sur un laps de temps plus longs que quatre années afin de minimiser l'effet de la variation annuelle sur le calcul du FFI.

Il serait également intéressant de recalculer les valeurs du FFI par la simulation des débits pour chaque bassins versant du plateau, afin de d'appréhender les éventuelles erreurs d'interpolation.

Remarque :

Il est à noter que la présente démarche peut présenter des limites sur un bassin versant majoritairement urbain. En effet, la réponse hydrologique d'un tel bassin est très spécifique et le régime particulier de ce milieu impose une prise en compte plus détaillée des débits.

En appliquant la méthode, on devra donc considérer les bassins urbains avec précaution, et envisager d'adapter si nécessaire la modélisation afin qu'elle soit plus adaptée à décrire spécifiquement l'hydrologie des bassins versant urbains.

e. Importance particulière en matière d'approvisionnement en eau potable

Un tel paramètre a été pris en compte afin d'apporter un regard particulier sur la prise en compte de la durabilité de l'approvisionnement en eau potable dans cette méthode. Ce paramètre est subjectif : c'est à la personne qui effectue la classification d'apprécier le besoin de péjorer un résultat dans un bassin présentant un fort enjeu en matière d'approvisionnement en eau potable.

2. Paramètres en discussion

Comme dans la première partie sur la classification de l'activité agricole, là aussi, deux paramètres ont été envisagés, et finalement rejetés de cette méthode. Ce sont tous deux des indicateurs relatif au sol : la perméabilité et la teneur en matière organique.

La **perméabilité** va traduire la capacité pour les précipitations à s'infiltrer avec aisance ou à ruisseler. Après réflexion, ce paramètre paraissait redondant avec celui du drainage. En fait, on peut considérer qu'un sol agricole est propre à l'agriculture, entre autre puisqu'il est suffisamment perméable. Dans le cas contraire, il va être drainé afin de lui redonner une perméabilité artificielle nécessaire à la pratique agricole.

La différence entre une perméabilité naturelle et celle donnée par la mise en place d'un drainage est le transfert facilité et accéléré des eaux de pluies vers les cours d'eau dans le cas de drainage. En plus d'accentuer le ruissellement, le drainage empêche ces eaux de transiter par le sol : il en résulte alors une diminution de la dégradation naturelle des produits phytosanitaires dans ce milieu.

Concernant la **teneur en matière organique** et les capacités du sol à retenir les substances phytosanitaires appliquées, le paramètre a été évincé de la méthode. En effet, considérant le territoire Suisse, on peut raisonnablement supposer que les valeurs vont être semblables d'une région à l'autre.

Si on veut aller plus loin dans le niveau de détail et prendre malgré tout en compte ce paramètre, des données existent. Une carte des aptitudes des sols de la Suisse est disponible sur le site internet de l'OFAG. Plusieurs paramètres décrivent les sols, dans le cas présent, le paramètre « Capacité de rétention des matières nutritives » peut être un indicateur de la teneur en matière organique.

L'inconvénient de ces données réside dans le manque d'explication quant à l'acquisition des données (d'où viennent elles, sont-elles interpolées ?...) et le manque de précision de l'échelle de quantification (aucun lien n'est fait entre les valeurs verbales et la signification concrète de ces classes) :

Propriétés du sol	Valeur numérique (code SIG)	Valeur verbale
Capacité de rétention en substances nutritives	-9999	inconnu
	0	inconnu
	1	extrêmement faible
	2	très faible
	3	faible
	4	moyen
	5	bon
	6	très bon

Dans l'hypothèse où des données locales, ou bien des données nationales mais plus renseignées viennent à exister, on pourra se baser sur les seuils fixés dans ARPEGES pour cette caractéristique :

Teneur en matière organique

faible	< 10 g/kg
moyen	10 – 20 g/kg
fort	> 20 g/kg

On peut également aller plus loin dans le niveau de détail des caractéristiques géologiques du sol. Par exemple, la carte pédologique du cadastre du canton de Vaud (voir un extrait en annexe 9.) est construite sur la base de nombreuses analyses de sol et le détail des différents types de sol à l'échelle d'un bassin versant est impressionnant. Un géologue peut très bien associer à chaque type de sol une équivalence en matière organique, et ces données peuvent être utilisées dans une méthode d'évaluation plus poussée dans le niveau de détail.

3. Évaluation de la vulnérabilité du bassin versant en fonction de ses caractéristiques propres

Paramètre	Critère d'évaluation	Points
Topographie		
Pente moyenne des surfaces agricoles [%]	< 1	+ 0 PE
	Entre 1 et 5	+ 2 PE
	Entre 5 et 10	+ 4 PE
	> 10	+ 8 PE
Caractéristiques du Bassin versant		
Densité du réseau hydraulique [km cours d'eau / km ² de bassin versant]	< 0,8	+ 1 PE
	Entre 0,8 et 1,15	+ 2 PE
	> 1,15	+ 4 PE
Coefficient de compacité : K de gravelius $G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}}$	< 1.5	+ 1 PE
	> 1.5	+ 2 PE
Hydrologie du bassin versant		
Fast flow index	FFI < 0.35	+ 1 PE
	0.35 < FFI < 0.50	+ 2 PE
	FFI > 0.50	+ 4 PE
Ressource en eau potable		
Importance particulière en matière d'approvisionnement en eau potable		+ 2 PE
Somme =		...
Classement du bassin versant		
Faible		< 8
Moyenne		8 - 12
Élevée		> 12

La détermination des seuils de chaque catégorie est basée sur une observation de la gamme des valeurs obtenues à la fin de l'attribution des points pour les deux bassins versant tests, dont les tableaux de résultats sont disponibles en Annexe 10.

La présente méthode a pour objectif principal de développer un concept de classification des bassins versant.

Le système d'attribution des points est provisoire et donné à titre d'exemple. Il doit être affiné et discuté plus précisément entre experts du domaine au cours d'une étude approfondie.

IV. RÉSULTATS : CLASSEMENT DE LA POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE DU BASSIN VERSANT

1. Matrice de croisement

Vulnérabilité du bassin versant	Intensité de l'activité agricole		
	Faible	Moyenne	Élevée
Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Moyenne	Faible	Moyenne	Élevée
Élevée	Moyenne	Élevée	Élevée

2. Résultats pour les bassins versants de la Venoge et la Chamberonne

L'Annexe 10. présente l'évaluation détaillée pour l'entier de chaque bassin versant.

Le bassin versant de la Venoge, pris dans son intégralité, présente une classe **moyenne** pour l'activité agricole du bassin versant et une classe également **moyenne** pour la vulnérabilité du bassin versant.

Vulnérabilité du bassin versant	Intensité de l'activité agricole		
	Faible	Moyenne	Élevée
Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Moyenne	Faible	Moyenne	Élevée
Élevée	Moyenne	Élevée	Élevée

Diagramme illustrant la sélection des classes moyennes pour la Venoge : une flèche horizontale rouge part de la cellule 'Moyenne' (Faible vulnérabilité, Moyenne activité) et une flèche verticale rouge descend de la cellule 'Moyenne' (Moyenne vulnérabilité, Moyenne activité) vers la cellule 'Moyenne' (Élevée vulnérabilité, Moyenne activité).

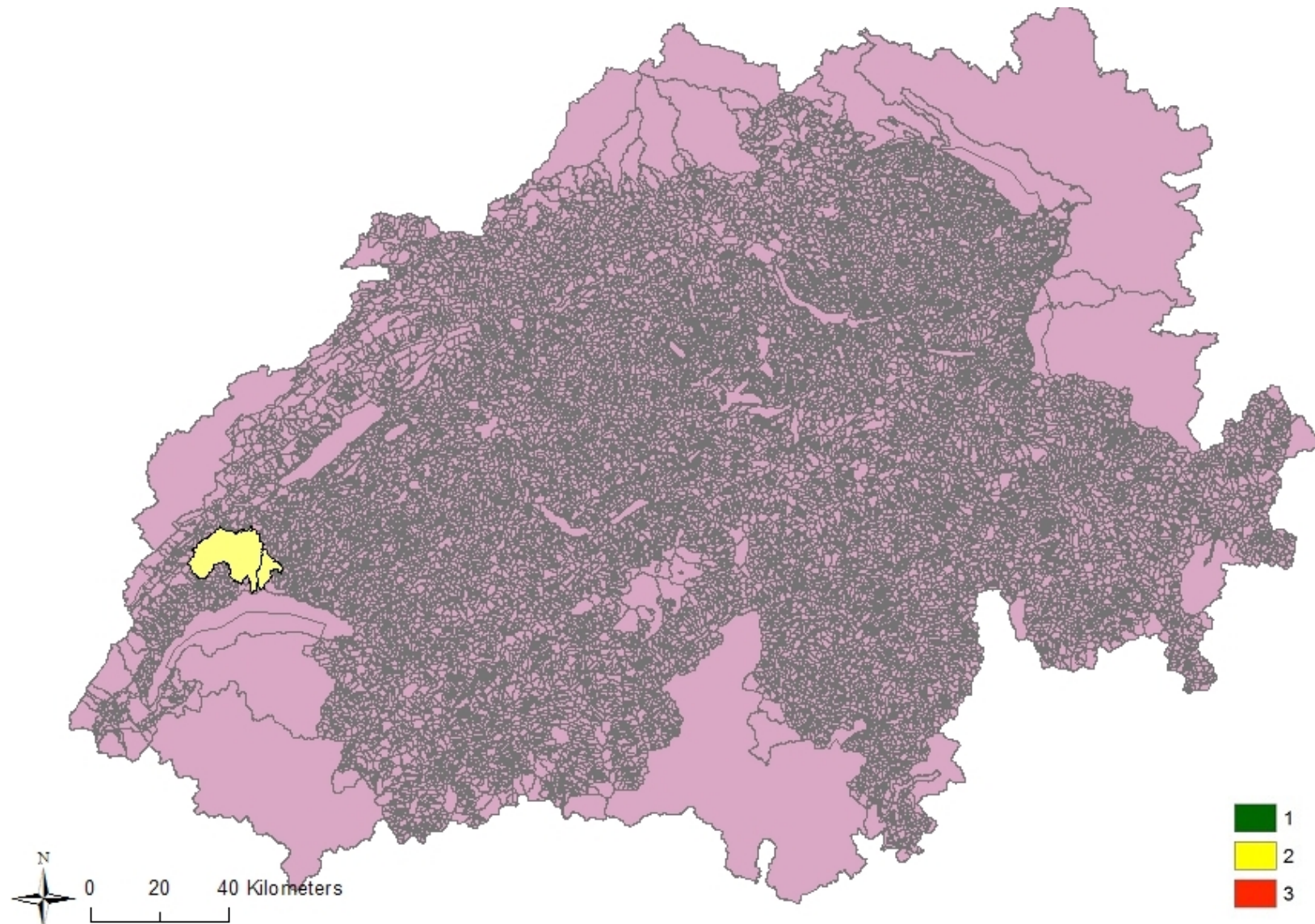
La Chamberonne, elle, présente une classe **moyenne** pour l'activité agricole du bassin versant et un **faible** risque en ce qui concerne la vulnérabilité du bassin versant.

Vulnérabilité du bassin versant	Intensité de l'activité agricole		
	Faible	Moyenne	Élevée
Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Moyenne	Faible	Moyenne	Élevée
Élevée	Moyenne	Élevée	Élevée

Diagramme illustrant la sélection des classes moyennes pour la Chamberonne : une flèche horizontale rouge part de la cellule 'Faible' (Faible vulnérabilité, Moyenne activité) et une flèche verticale rouge descend de la cellule 'Moyenne' (Moyenne vulnérabilité, Moyenne activité) vers la cellule 'Moyenne' (Élevée vulnérabilité, Moyenne activité).

Ainsi, les deux bassins versants tests présentent un risque **MOYEN** de pollution diffuse d'origine agricole.

Classement des deux bassins versant tests :

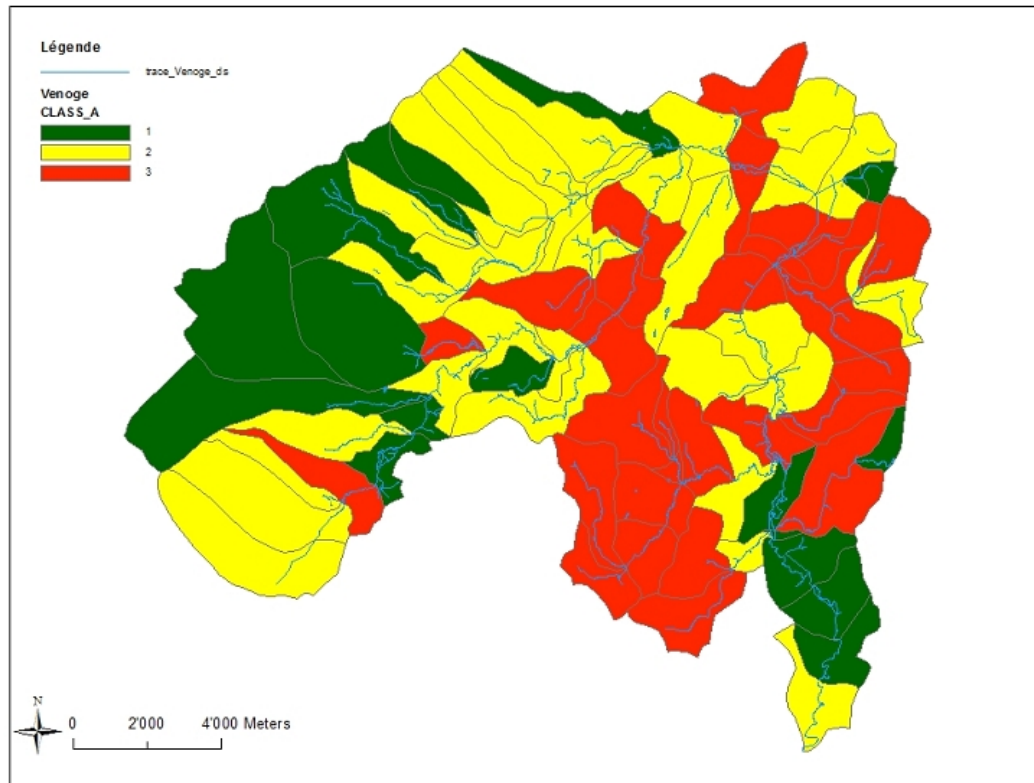


3. Résultats pour les deux bassins versant tests

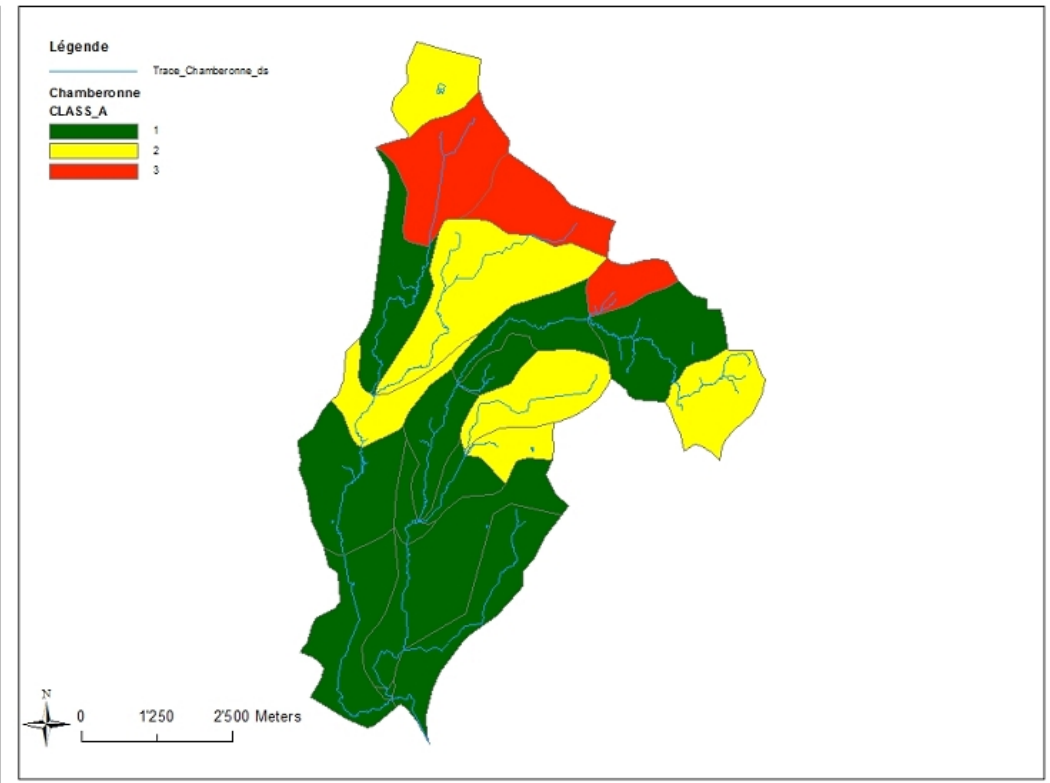
Après la **première phase** de classification, celle consistant à évaluer l'intensité de l'**activité agricole** sur le bassin versant, on obtient les résultats suivants :

CLASSEMENT ACTIVITÉ AGRICOLE

Bassin versant de la Venoge



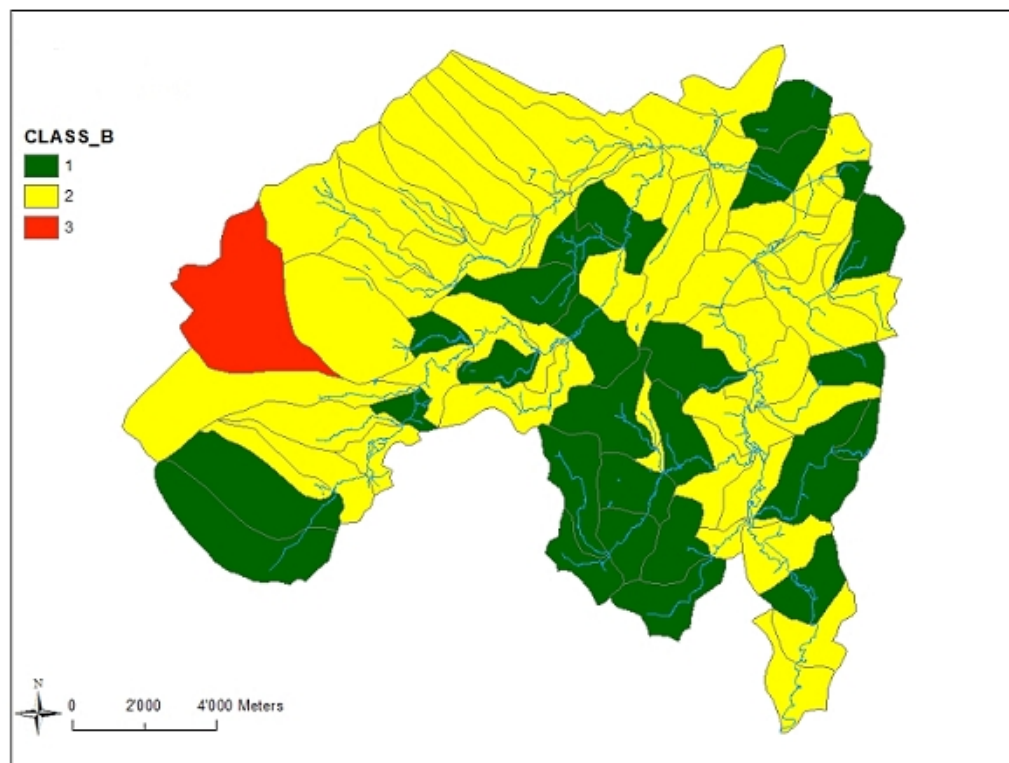
Bassin versant de la Chamberonne



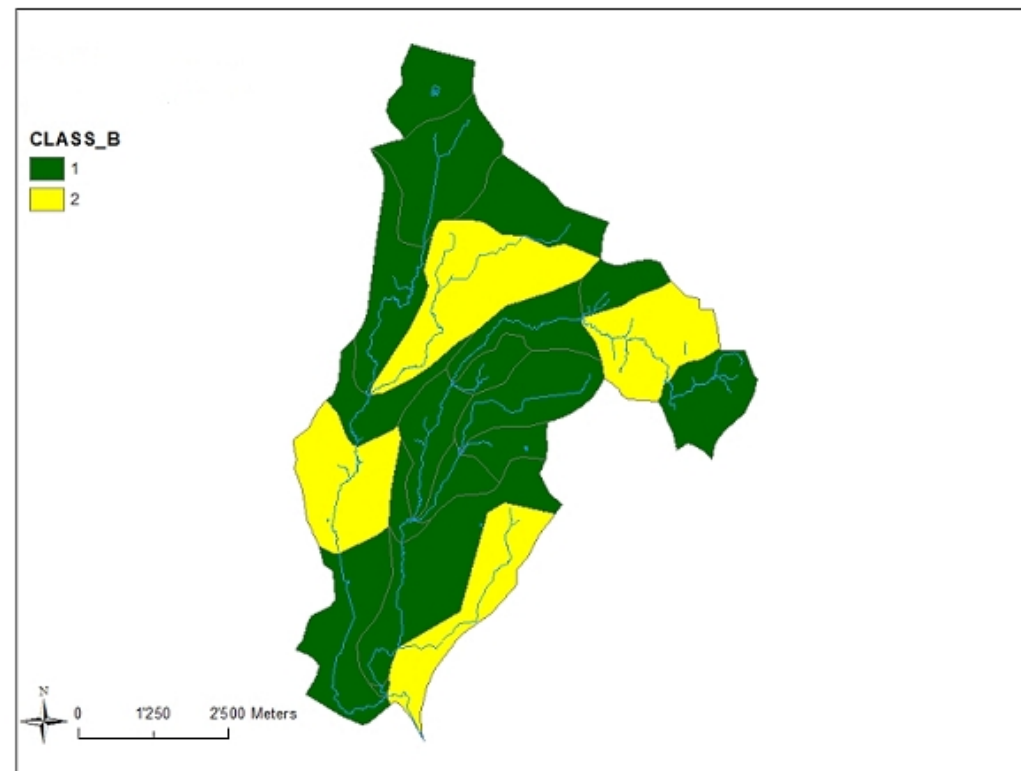
La **deuxième phase** de classification, consistant à évaluer la **vulnérabilité intrinsèque du bassin versant**, donne les résultats suivants :

CLASSEMENT VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT

Bassin versant de la Venoge

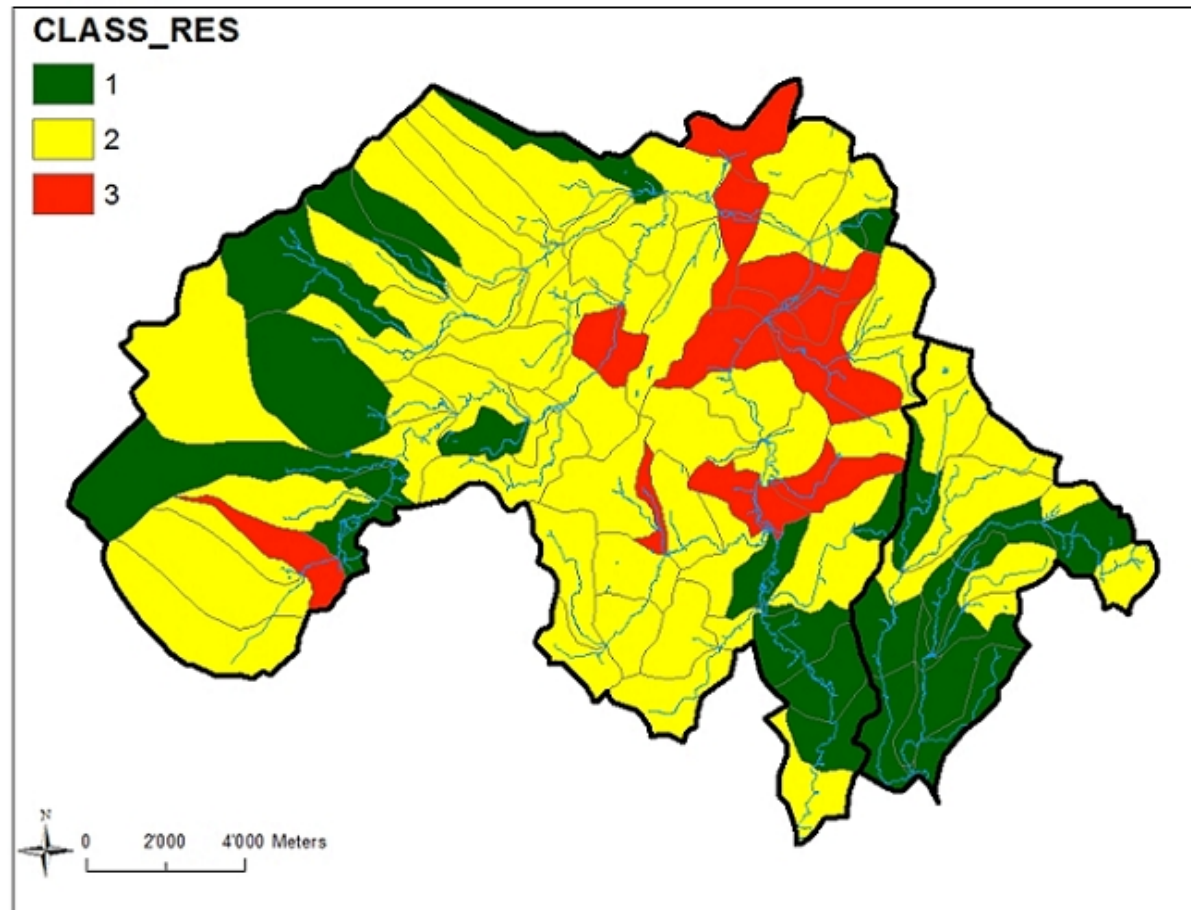


Bassin versant de la Chamberonne



Après croisement des deux résultats précédent selon la matrice du paragraphe IV.1., on obtient la carte finale de classification suivante :

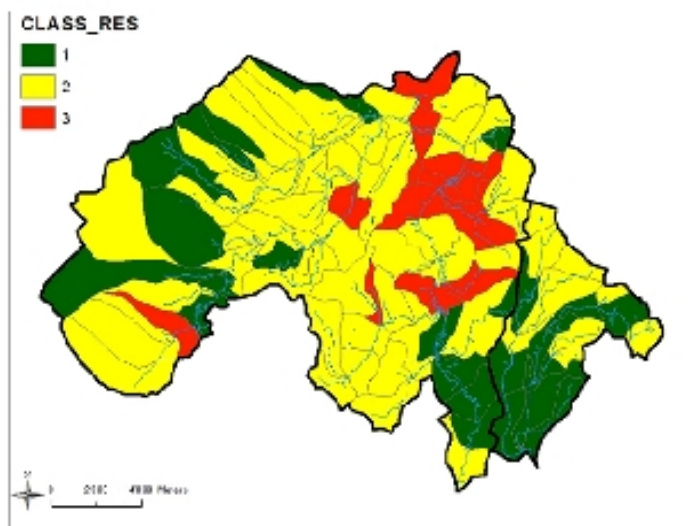
CLASSEMENT DES RISQUES DE POLLUTION DIFFUSE D'ORIGINE AGRICOLE DU BASSIN VERSANT



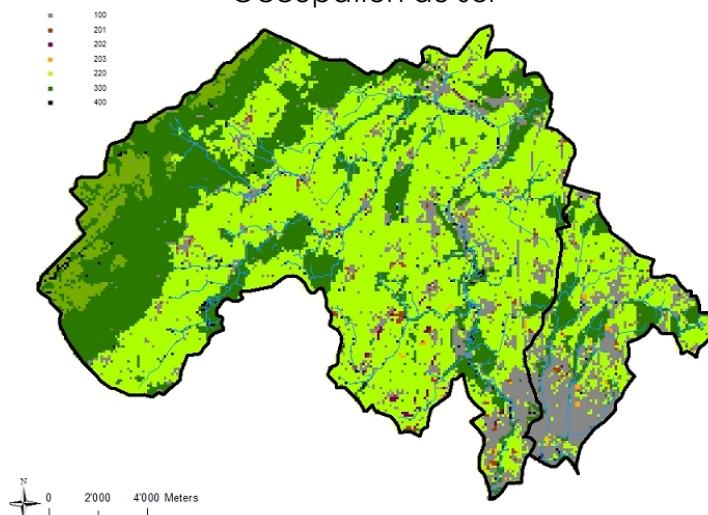
V. VALIDATION DE LA MÉTHODE

1. Résultats et occupation du sol

Classement final des bassins versant



Occupation du sol



La carte produite ci-dessus à gauche, montre une différenciation des bassins versants. Afin de vérifier en première approche les résultats avec la réalité du terrain, on peut tout d'abord comparer cette carte avec l'occupation du sol.

On observe très clairement que la grande majorité des zones de forêts (Nord-Ouest de la Venoge) et des zones urbaines (Sud de la Chamberonne) sont classées en zone 1, non prioritaires. Ce résultat est attendu et rassurant, dans la mesure où ces zones ne possèdent pas ou seulement peu de surfaces destinées à l'agriculture, et donc un risque de pollution diffuse d'origine agricole très faible.

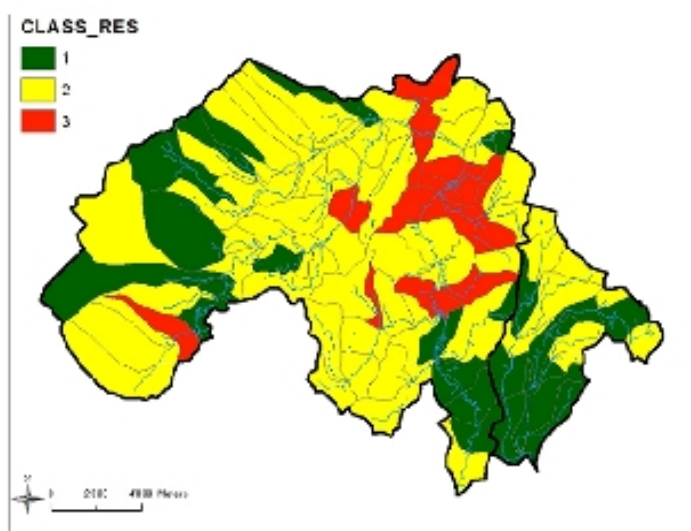
Les zones de classe 2, pour leur part, recouvrent principalement le centre du bassin versant. Il s'agit d'un autre résultat intéressant dans la mesure où elles concentrent la très grande majorité des zones à caractère agricole. En revanche, l'occupation du sol ne permet pas de déterminer avec certitude la différence entre une zone de classe 2 et de classe 3. Tout au plus peut-on noter dans certains sous-bassins versants de classe 3 une plus grande importance des cultures plus impactantes comme l'arboriculture ou la viticulture.

Dans l'ensemble, ces résultats sont donc plutôt cohérents avec l'occupation du sol, étant donné qu'une distinction s'opère entre les différents sous-bassins versants agricoles. Il faut à présent effectuer des comparaisons avec d'autres méthodes d'évaluation, afin de déterminer la qualité des résultats obtenus.

Le principal obstacle pour cela tient dans la dimension cumulative des méthodes classiques d'évaluation de la qualité des eaux. Un apport à un certain point de la rivière aura des conséquences sur les résultats de tout le bassin versant à l'aval. Ces méthodes possèdent l'avantage de permettre une détermination rapide de la qualité globale de l'eau en un point. En revanche, cela ne permet pas ou mal de déterminer quels sont les points où une action serait bienvenue pour améliorer la situation. Tout au plus peut-on observer les changements d'appréciation entre les stations de mesure pour évaluer l'importance des apports entre les deux stations.

2. Indice IGCH

L'indice IGCH est un indicateur utilisé dans le canton de Vaud, permettant d'apprécier l'état d'un cours d'eau en se concentrant sur l'étude du macrozoobenthos. Il est dérivé de l'indice IGBN. La présence ou non de ces organismes dans le milieu naturel est un bon indicateur de la qualité des eaux. Les résultats finaux sont présentés en 5 classes, avec une notation de 0 à 20.



Classement final des bassins versant

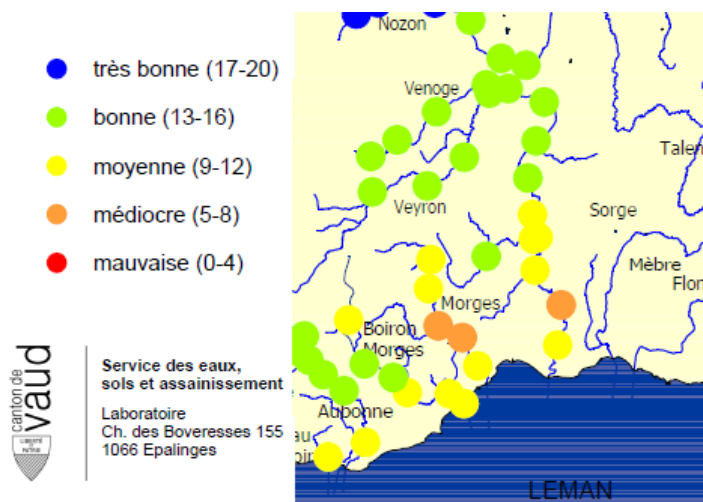


Illustration 21: Classes de qualité biologique des cours d'eau vaudois basées sur l'indice IBCH (2009/2010)

La Venoge est étudiée à plusieurs endroits de son parcours. La tendance générale observée est une eau de bonne qualité biologique sur la partie amont du cours d'eau, puis on observe une dégradation de la qualité (moyenne à médiocre) en allant vers l'aval.

On peut noter qu'à l'amont du bassin versant, là où les classes sont 1 ou 2, la qualité est bonne. Puis, plus à l'aval, après que le cours d'eau ait traversé l'agrégat de zones de classe 3 (au Nord Est), la qualité de l'eau devient moyenne. On peut probablement imputer en partie cette dégradation à l'apport de pollutions diffuses agricoles, puisque les zones urbaines à cet endroit sont relativement limitées.

Ensuite, un point présente une qualité biologique médiocre, tandis qu'il est classé en classe 1 d'après la méthode d'évaluation présente. On peut expliquer que ce résultat ne corresponde pas par deux faits :

- D'une part, l'IBCH ne prend pas en compte uniquement les effets des pesticides : ainsi la zone en question, majoritairement urbaine (voir la carte d'occupation des sols du paragraphe précédent), ne sera pas significative en matière de pollution agricole, mais pourra l'être en matière de pollution urbaine. On peut donc probablement expliquer cette dégradation par des rejets d'eaux anthropiques, chargées de polluants typiques des zones urbaines et anthropisées.
- D'autre part, on se trouve face à la problématique cumulative (d'agrégation) lors des interprétations. Il faut en effet tenir compte qu'une dégradation en un point est souvent révélatrice d'une problématique de rejet entre le point en question et le point précédent,

doublé d'un effet d'accumulation des concentrations (ou des rejets) au fil du cours d'eau. Le classement par sous bassins versant par contre prend en compte uniquement les caractéristiques de chaque sous bassin, sans prendre en compte l'éventuel effet d'accumulation progressive des risques en fonction des résultats de l'amont.

3. « Qualité pesticides » - SESA




Le SESA a effectué de 2002 à 2004 une série d'analyses des pesticides sur les cours d'eau vaudois : 31 substances sont recherchées et 26 ont été détectées au moins une fois (Vioget et Strawczynski, 2005)⁶. Pour chaque site, entre cinq et sept campagnes de mesures ont été réalisées.

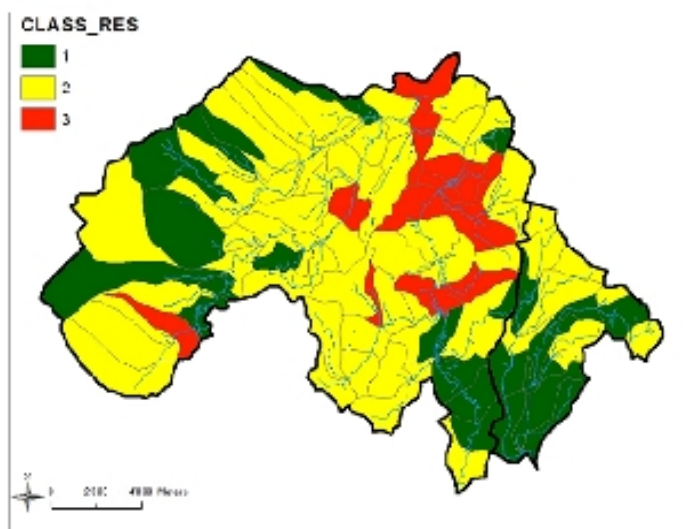
Pour la Venoge, comme présenté sur l'illustration 22, six sites ont été analysés.

Pour chacun de ces sites, la somme des concentrations de ces 31 substances est calculée, puis une note de 1 à 3 est attribuée. Ces notes sont ensuite moyennées sur l'ensemble des campagnes réalisées.

La classification est la suivante :

Somme des concentrations	Note
< 250 ng/L	1
250 à 500 ng/L	2
> 500 ng/L	3

Classement	Moyenne des notes par site
	1 – 1,5
	1,5 - 2
	2 - 3



Classement final des bassins versant

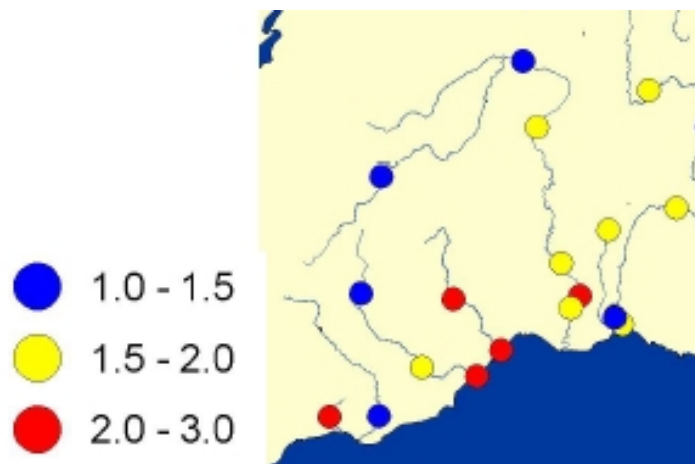


Illustration 22: "Qualité pesticides" de la Venoge et la Chamberonne : 2002/2004 (Vioget & Strawczynski, 2005)

⁶ Les 26 substances détectées au moins une fois sont les suivantes : Atrazine, Chlorbromuron, Chloridazon, Chlortoluron, Cyanazine, Dimefuron, Dimethyltoluamide, Diuron, Ethofumesate, Hexazinone, Isoproturon, Linuron, Metamitron, Methabenzthiazuron, Metolachlor, Metoxuron, Metribuzin, Napropamid, Pendimethaline, Prometrine, Propachlor, Simazine, Terbutylazine, Bromopropylate, Carbendazim et Carbofuran.

Pour la Venoge, la même tendance que pour l'indice IBCH est visible ici pour l'indice « qualité pesticides » : bonne à l'amont, puis se dégradant vers l'aval, avec un pic dans la partie urbaine du bassin versant.

De la même façon donc, à l'amont du bassin les zones de classe 1 ou 2 induisent une bonne « qualité pesticide » (note : 1-1.5).

Ensuite, dès que l'on passe l'agrégat de zones de classes 3, la qualité devient moyenne (note : 1.5-2).

Enfin, là aussi le point présentant une mauvaise qualité pesticides (note ; 2-3) reste difficilement explicable. En effet, ici, contrairement au paragraphe précédent, on considère bien uniquement les pesticides. On devrait donc probablement voir un point jaune (conservation des caractéristiques précédentes dû à l'effet d'accumulation le long du cours d'eau) ou vert (amélioration) puisque les zones alentours ne sont pas problématiques en matière de pollution diffuse des eaux de surfaces (classe 1). Cette forte valeur de l'indice pesticide peut s'expliquer par des rejets de ces substances par les activités industrielles des zones urbaines ou encore par l'utilisation de pesticides dans les espaces verts publics ou les jardins familiaux. Ces activités, peuvent en effet potentiellement rejeter des pesticides dans les eaux de surfaces. Malheureusement, elles ne sont pas prises en compte dans la méthode d'évaluation développée.

Par là, on pointe du doigt la limite que présente cette méthode dans les zones urbaines. En effet, elles sont à considérer indépendamment des zones agricoles, si l'on veut traduire au mieux et être au plus près de la réalité quant à la problématique pesticides de ces zones.

VI. CONCLUSION

Dans le travail présenté dans ce rapport, a été développée une méthode d'évaluation de l'impact des activités agricoles sur les eaux de surface, en se focalisant sur la problématique de la pollution diffuse.

Le méthodologie est basée sur trois fondements élémentaires :

- l'approche s'est faite par bassins versants, indépendamment des limites administratives, afin de présenter une cohérence hydrologique, tant au niveau de la problématique pollutive que de la part de décision (mise en place d'actions) qui en résulte,
- la méthode se doit d'être simple : elle doit être réalisable à partir de données disponibles facilement et idéalement des données officielles : fédérales, cantonales, communales ou locales. De plus, l'utilisation de la notion des substances en elles-même doit être dépassée du fait de la multiplicité de celles-ci et de leurs caractéristiques propres,
- enfin, l'approche doit être multiscale : elle doit être adaptée aussi bien au niveau d'un important bassin versant tel que celui du Rhône, que des bassins versants classiques tels que la Venoge ou la Chamberonne et leurs sous-bassins versant respectifs.

Une différenciation des bassins versants (et sous bassins versant) a pu être effectuée, et les résultats obtenus sont encourageants. Le résultat des classifications correspond à priori aux méthodes d'évaluation existantes. Dans le cadre de cette étude des risques de pollution diffuse d'origine agricole, la validation de la méthode a permis de confirmer les résultats de classification.

Seule la prise en compte des zones urbaines reste à éclaircir, dans la mesure où l'on souhaite une étude globale de la pollution diffuse : agricole et urbaine.

Également, l'attribution des points équivalents attribués pour chaque paramètre demande à être précisée et validée, notamment par la mise en place d'un groupe de travail composé d'experts chargés de pondérer chaque paramètre par rapport aux autres et de définir le nombre de points adéquats à ajouter ou retrancher.

VII. BIBLIOGRAPHIE

Textes législatifs

OFEFP, (2002). *Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication*. OFEFP, Berne.

Littérature scientifique

Aschwanden et Kann (1999), *Hydrologische Mitteilungen* Nr.27, Landeshydrologie und -geologie, Bern

Chèvre N., Singer H., Müller S.R. (2003), *Risikobeurteilung von Pestiziden in Schweizer Oberflächengewässern*. *Gaz Wasser Abwasser (GWA)*, 83(12) : p.906-917.

Chèvre N. (2005), *Pesticides : quel risque pour les eaux ?* Eawag news 59

Béguin J., et al. (2008). *État des drainages en Suisse, Bilan de l'enquête 2008*. DFE-OFAG (Département Fédéral de l'Économie et Office Fédéral de l'Agriculture)

Favre G., AGRIDEA. (2010), *Pratiques phytosanitaires en grandes cultures de 1992 à 2004*. AGRIDEA

Gauroy C., et al. (2012). *ARPEGES : Analyse de Risque Pesticides pour la Gestion des Eaux de Surface*, Évaluation du risque de contamination par les produits phytosanitaires des masses d'eau de surface. Onema (Office national de l'Eau et des Milieux Aquatiques)

INERIS-CEMAGREF. (2006). *Transpest 16, recherche sur le déterminisme du transfert des pesticides et leur devenir dans les eaux de surface : incidence sur l'évaluation des risques*

INRA-CEMAGREF. (2005). *Pesticides, agriculture et environnement*. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Éditions Quae.

Klein A., et al. (2007). *Pesticides d'origine agricole dans le bassin versant Suisse du Léman*, Campagne 2006. CIPEL

Gregorio V. (2009). *Rapport 2008/2009 : Méthode de sélection de pesticides prioritaires à surveiller dans l'eau des sources appartenant à eauservice*. UNIL - eauservice

Manco F. (2007). *Pour le bassin Lémanique, Inventaire des pesticides utilisés dans l'agriculture et relations avec les teneurs mesurées dans les eaux du lac et des rivières*. Rapport de stage. CIPEL

Mercier S. Et al. (2013). Détermination du risque de transfert de cuivre entre les parcelles viticoles et le cours d'eau, à l'aide des systèmes d'information géographiques, dans le bassin versant des Charmilles (Genève, Suisse). Novatech

OFAG (2012). *Modèle de géodonnées minimal - 77.2 Carte des aptitudes des sols de la Suisse*

Siber R., et al. (2009). *Modeling potential herbicide loss to surface waters on the Swiss plateau*. *Journal of Environmental Management* 91, p 290–302

Tellier S. et al. (2006). *Les pesticides en milieu agricole : état de la situation environnementale et initiatives prometteuses*. Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.

Van Den Berg F., et al. (1999). *Emission of the pesticides into the air*. *Water Air and Soil Pollution* 115: 195-218.

VIOGET P., STRAWCZYNSKI A. (2005). *Pesticides dans les cours d'eau vaudois en 2002, 2003 et 2004*. Lausanne: SESA

Wittmer I., Junghans M., Stamm C., Singer H. (in Bearbeitung), *Erhebungs und Beurteilung für Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen*, Studie im Auftrag des BAFU. Eawag, Dübendorf

Sites Internet

Cours d'hydrologie générale, André Musy, page consultée le 04.12.2012. Chapitre 3 : précipitations – 3.3 : Analyse de la mesure ponctuelle – 3.3.4 : Les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre3/main.html>

Office Fédéral de l'Environnement, page consultée le 22.11.2012. Géodonnées de la subdivision de la Suisse en bassins versant : <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01835/11452/index.html?lang=fr>

Office Fédéral de la Statistique, page consultée le 02.10.2012. Ventes de produits phytosanitaires : <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/07/03/blank/ind24.indicator.240502.2405.html?open=2001#2001>

Office Fédéral de la Statistique, page consultée le 20.10.2012. Statistique de la superficie selon nomenclature 2004 : utilisation du sol : http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/arealstatistik_nolu04.html

Office Fédéral de la Topographie SWISSTOPO, page consultée le 25.11.2012. MNT Swiss Alti 3D : <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/height/swissALTI3D.html>

Etat de Vaud, page consultée le 05.11.2012. Plan de protection de la Venoge – Périmètre de gestion forestière : <http://www.vd.ch/themes/environnement/eau/rivieres/venoge-pac/1er-train-de-mesures/le-perimetre-de-gestion-forestiere/>

VIII. ANNEXES

1. Application des substances phytosanitaires selon la période

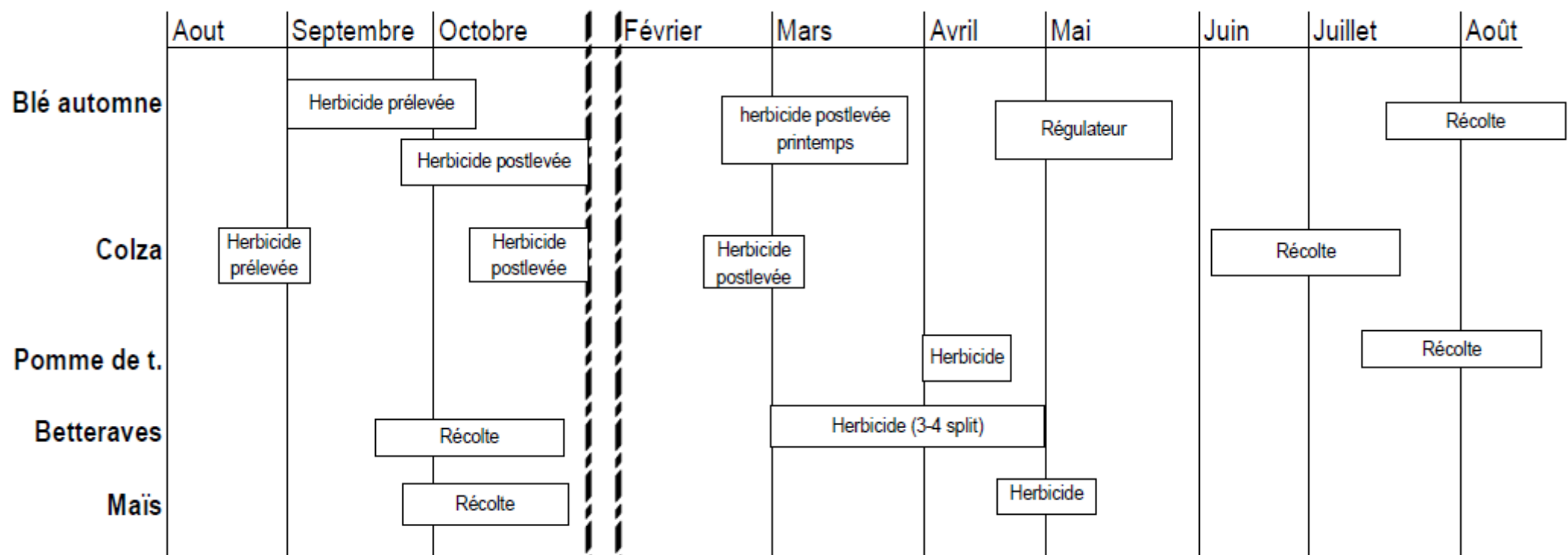


Illustration tirée du *Rapport 2008/2009 : Méthode de sélection de pesticides prioritaires à surveiller dans l'eau des sources appartenant à eauservice* (source : Service de protection des plantes du canton de Vaud).

2. Catégories de la nomenclature de l'utilisation du sol 2004

Pour les besoins de cette étude, seules 8 catégories d'utilisation du sol ont été conservées. Cinq catégories définissent l'ensemble des surfaces agricoles, les trois autres sont relatives aux aires que l'on pourrait qualifier d'urbaines, aux surfaces de forêts et aux surfaces improductives.

Habitat et infrastructure	100	Aires de bâtiments	101	Aires de bâtiments & aires industrielles > 1 ha
			102	Aires de bâtiments & aires industrielles < 1 ha
			103	Aires de maisons individuelles et de maisons de 2 logements
			104	Aires de maisons alignées et en terrasses
			105	Aires d'immeubles résidentiels
			106	Aires de bâtiments publics
			107	Aires de bâtiments agricoles
			108	Aires de bâtiments non déterminés
	120	Surfaces de transport	121	Aires autoroutières
			122	Aires routières
			123	Aires de stationnement
			124	Aires ferroviaires
			125	Aérodromes
	140	Surfaces d'infrastructure spéciale	141	Installations d'approvisionnement en énergie
			142	Stations d'épuration des eaux usées
			143	Autres installations d'approvisionnement et d'élimination
			144	Décharges
			145	Extraction de matériaux
			146	Chantiers
			147	Friches industrielles et bâtiments désaffectés
	160	Espaces verts et lieux de détente	161	Parcs publics
			162	Installations de sport
			163	Terrains de golf
			164	Terrains de camping
			165	Jardins familiaux
			166	Cimetières
Agriculture	200	Arboriculture, viticulture, horticulture	201	Arboriculture
			202	Viticulture
			203	Horticulture
	220	Cultures fourragères et de plein champ	221	Terres arables au sens large
			222	Prairies naturelles au sens large
			223	Pâturages locaux au sens large
	240	Alpages	241	Alpages fauchés au sens large
			242	Alpages pâturés au sens large
			243	Alpes à moutons au sens large
Aires boisées	300	Forêt (exploitation agricole non comprise)	301	Peuplements forestiers
			302	Aires afforestées

Aires improductives			303	Coupes de bois
			304	Surfaces forestières dévastées
	400	Lacs et cours d'eau	401	Lacs
			402	Rivières, ruisseaux
			403	Ouvrages de protection contre les crues
	420	Terres improductives	421	Aucune utilisation
			422	Ouvrages de protection (pierres, avalanches)
			423	Infrastructure de sports alpins
			424	Interventions dans le paysage

3. Poids attribués aux substances selon la classification SIRIS

Substances issues de la liste des 42 substances prioritaires (Copin, 2008)

Substances	Classification SIRIS (Copin, 2008)			Valeurs normalisées			POIDS (moyenne)
	Rang	log(DJA)	-log(PNEC)	Rang	log(DJA)	-log(PNEC)	
aclonifen	35		-1,17	54	0	22	25
chlorothalonil	53		-1,43	82	0	26	36
chlortoluron	43		-1	66	0	19	28
cypermethrin	35		-5,4	54	0	100	51
diflubenzuron	35		-2,4	54	0	44	33
diflufenican	35		-1,61	54	0	30	28
dimethenamid	44		-1,4	68	0	26	31
flazasulfuron	42		-2,7	65	0	50	38
metolachlor	52		-1,15	80	0	21	34
metsulfuron-methyl	35		-1,8	54	0	33	29
penconazole	41		-1,44	63	0	27	30
pendimethalin	35		-1,15	54	0	21	25
pirimicarb	35		-1,05	54	0	19	24
spiroxamine	39		-1,49	60	0	28	29
alachlor	44	-3,3		68	77	0	48
bromoxynil	30	-2		46	47	0	31
dichlobenil	63	-2		97	47	0	48
diuron	41	-2,82		63	66	0	43
epoxyconazole	35	-2,3		54	53	0	36
fluazifop-P-butyl	42	-2		65	47	0	37
indoxacarb	44	-2,22		68	52	0	40
ioxynil	35	-2,3		54	53	0	36
MCPP-P	44	-2		68	47	0	38
mecoprop	49	-2		75	47	0	41
oxadixyl	35	-2		54	47	0	33
phosalone	44	-2,6		68	60	0	43
propineb	31	-2,15		48	50	0	33
sulcotrione	38	-4,3		58	100	0	53
atrazine	46	-3,3	-2,8	71	77	52	66
carbofuran	35	-3	-3	54	70	56	60
chlorfenvinphos	39	-3,3	-2	60	77	37	58
cyhexatin	35	-3,3	-3,47	54	77	64	65
diazinon	37	-2,7	-2,52	57	63	47	55
dinoseb	41	-2,7	-1,25	63	63	23	50
diquat	47	-2,7	-1,42	72	63	26	54
fenazaquin	35	-2,3	-1,85	54	53	34	47
fenpropathrin	35	-2	-1	54	47	19	40
fenpropidin	47	-2,3	-1	72	53	19	48
linuron	46	-2,52	-1,48	71	59	27	52
prochloraz	41	-2	-1,3	63	47	24	45
simazine	39	-3	-2,21	60	70	41	57
terbuthylazine	39	-2,66	-1,22	60	62	23	48

Substances absentes de la liste des 42 substances prioritaires, mais présentes dans les 8 substances les plus utilisées en arboriculture/viticulture/culture en plein champs

Substances	Classification SIRIS (Copin, 2008)			Valeurs normalisées			POIDS (moyenne)
	Rang	log(DJA)	-log(PNEC)	Rang	log(DJA)	-log(PNEC)	
Captane	27	-2	-0,99	42	47	18	35
Glyphosate	65	-0,52	-1,78	100	12	33	48
Dithianon	29	-2		45	47	0	30
Folpet	27	-1	-0,99	42	23	18	28
Cyprodinil	41	-1,52		63	35	0	33
Amitraz	17	-2		26	47	0	24
Fesetyl-Aluminium	55	0	-2,47	85	0	46	43
Mancozeb	50	-1,52	-0,26	77	35	5	39
Dichlofluanid	23	-1,90		35	44	0	27
Cymoxanil				0	0	0	0
Orbencarb				0	0	0	0
Manèbe	16	-2,52		25	59	0	28
Métamitrone	52	-1,60	-0,15	80	37	3	40
Chloridazon	32	-1,60	-1	49	37	19	35
Fluaziname	35	-2	-0,041	54	47	1	34

8 substances les plus utilisées en arboriculture/viticulture/culture en plein champs

Arboriculture	Viticulture	Plein champs
Captane	Folpet	Mancozeb
Glyphosate	Fesetyl-Aluminium	Orbencarb
Phosalone	Glyphosate	Dinosèbe
Dithianon	Mancozeb	Manèbe
Folpet	Dichlofluanid	Métamitrone
Cyprodinil	Cymoxanil	Atrazine
Amitraz	Cyprodinil	Chloridazon
Triflumizole	Spiroxamine	Diquat

4. Pondération de chaque type de culture en fonction du poids des substances et de leur application

	POIDS	POIDS normalisé	Substances appliquées [kg/ha]			POINTS = POIDS normalisé x quantité		
			Arboriculture	Viticulture	Plein champs	Arboriculture	Viticulture	Plein champs
aclonifen	25,2	0,379				0	0	0
chlorothalonil	36,0	0,542	0	0,101	0,247	0	0,055	0,13
chlortoluron	28,2	0,425	0	0	0,0723	0	0	0,031
cypermethrin	51,3	0,772	0,003	0	0,006	0,0021	0	0,005
diflubenzuron	32,8	0,493	0,033	0	0	0,016	0	0
diflufenican	27,9	0,420	0	0	0,0193	0	0	0,0081
dimethenamid	31,2	0,470				0	0	0
flazasulfuron	38,2	0,575	0	0,0058	0	0	0,0033	0
metolachlor	33,8	0,508	0	0	0,183	0	0	0,093
metsulfuron-methyl	29,1	0,437				0	0	0
penconazole	29,9	0,450	0,016	0,014	0	0,0071	0,0065	0
pendimethalin	25,0	0,377	0	0	0,117	0	0	0,044
pirimicarb	24,4	0,368	0,082	0	0	0,030	0	0
spiroxamine	29,2	0,439	0	0,181	0	0	0,080	0
alachlor	48,1	0,724				0	0	0
bromoxynil	30,9	0,465	0	0	0,030	0	0	0,014
dichlobenil	47,8	0,719	0	0,0357	0	0	0,026	0
diuron	42,9	0,645	0,196	0,040	0	0,13	0,026	0
epoxyconazole	35,8	0,538	0	0	0,0175	0	0	0,0094
fluazifop-P-butyl	37,0	0,557	0	0,0001	0,0121	0	0,000064	0,0068
indoxacarb	39,8	0,599	0,0007	0,0560	0	0,00040	0,034	0
ioxynil	35,8	0,538	0	0	0,064	0	0	0,034
MCPP-P	38,1	0,573	0	0	0,066	0	0	0,038
mecoprop	40,6	0,611	0,022	0	0	0,013	0	0
oxadixyl	33,5	0,503				0	0	0
phosalone	42,7	0,643	1,06	0	0	0,68	0	0
propineb	32,6	0,490	0	0,049	0	0	0,024	0
sulcotrione	52,8	0,795	0	0	0,0546	0	0	0,043
atrazine	66,5	1,000	0	0	0,000	0	0	0
carbofuran	59,7	0,899				0	0	0
chlorfenvinphos	57,9	0,872	0,047	0	0	0,041	0	0
cyhexatin	64,9	0,977	0,002	0,004	0	0,0022	0,0043	0
diazinon	55,5	0,835	0,074	0,042	0	0,062	0,035	0
dinoseb	49,7	0,747	0	0	0,992	0	0	0,74
diquat	53,8	0,810	0	0,00022	0,373	0	0,00017	0,30
fenazaquin	47,2	0,710	0,0015	0	0	0,0010	0	0
fenpropathrin	39,6	0,596				0	0	0
fenpropidin	48,1	0,724	0	0,0986	0	0	0,071	0
linuron	52,3	0,786	0,081	0,007	0	0,064	0,0052	0
prochloraz	44,6	0,670	0,002	0	0,0161	0,0013	0	0,011
simazine	56,9	0,856	0,099	0,028	0	0,085	0,024	0
terbuthylazine	48,2	0,725	0,020	0,040	0	0,014	0,029	0
SOMME =						1,15	0,42	1,51

En ne prenant en compte les seules substances présentes dans la liste des 42 substances prioritaires dressée pour la région lémanique (Copin, 2008), on est face à une problématique de représentation des types de cultures. En effet, on aura tendance, en se restreignant à ces 42 substances, à surestimer la pondération des cultures en plein champs puisque les substances majoritairement appliquées dans ces grandes cultures sont celles présentes dans la liste.

Par contre, bon nombre de produits phytosanitaires massivement appliqués dans les cultures arboricoles et viticoles n'apparaissent pas dans la liste des 42 substances prioritaires. On néglige alors une contribution de ces cultures. Par exemple, en arboriculture, la substance la plus appliquée est le Captane à raison de 13.6 kg/ha, soit près de 3 et 7 fois plus que les applications les plus importantes en viticulture (folpet) et en plein champs (mancozeb), respectivement.

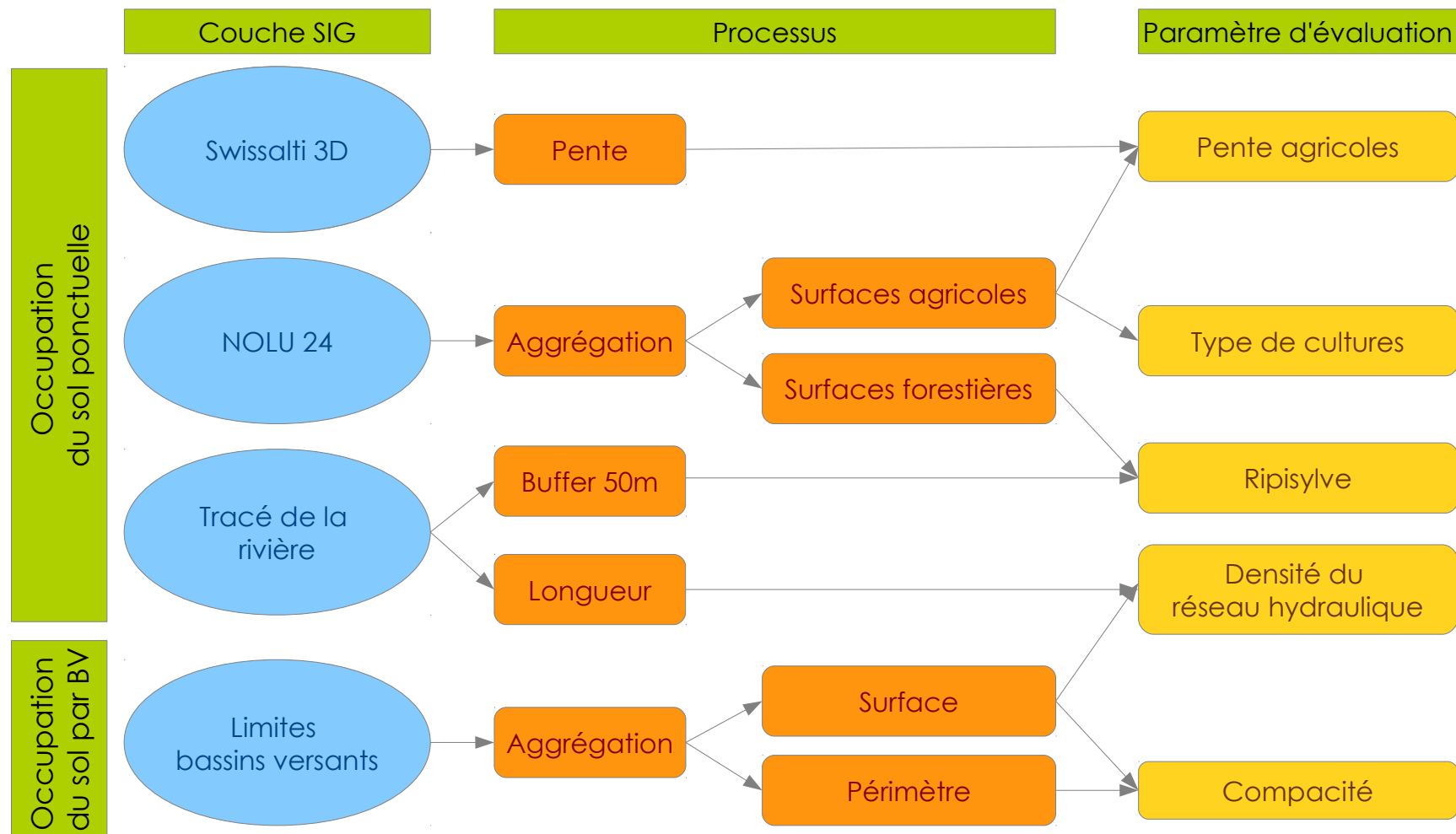
D'où l'importance de considérer une deuxième liste de substances : nous avons donc choisi de prendre en compte les 8 substances les plus appliquées sur chaque type de culture.

	POIDS	POIDS normalisé	Substances appliquées [kg/ha]			POINTS = POIDS normalisé x quantité		
			Arboriculture	Viticulture	Plein champs	Arboriculture	Viticulture	Plein champs
Captane	35,5	0,534	13,624	0	0	7,27	0	0
Glyphosate	48,4	0,728	1,746	1,505	0,208	1,27	1,10	0,15
Dithianon	30,4	0,457	0,822	0,003	0	0,38	0,0015	0
Folpet	27,7	0,417	0,625	4,575	0,0143	0,26	1,91	0,0060
Cyprodinil	32,8	0,494	0,486	0,210	0,0563	0,24	0,10	0,028
Amitraz	24,2	0,364	0,440	0	0	0,16	0	0
Fesetyl-Aluminium	43,5	0,654	0	2,364	0	0	1,55	0
Mancozeb	39,0	0,587	0,0796	0,535	1,936	0,047	0,31	1,14
Dichlofluanid	26,5	0,399	0	0,330	0	0	0,13	0
Cymoxanil	0,0	0,000	0	0,271	0,084	0	0	0
Orbencarb	0,0	0,000	0	0	0,999	0	0	0
Manèbe	27,8	0,418	0	0	0,791	0	0	0,33
Métamitron	40,0	0,602	0	0	0,596	0	0	0,36
Chloridazon	35,0	0,527	0	0	0,484	0	0	0,26
Fluaziname	33,7	0,507	0	0,0420	0,230	0	0,021	0,12
SOMME =						10,77	5,54	3,90

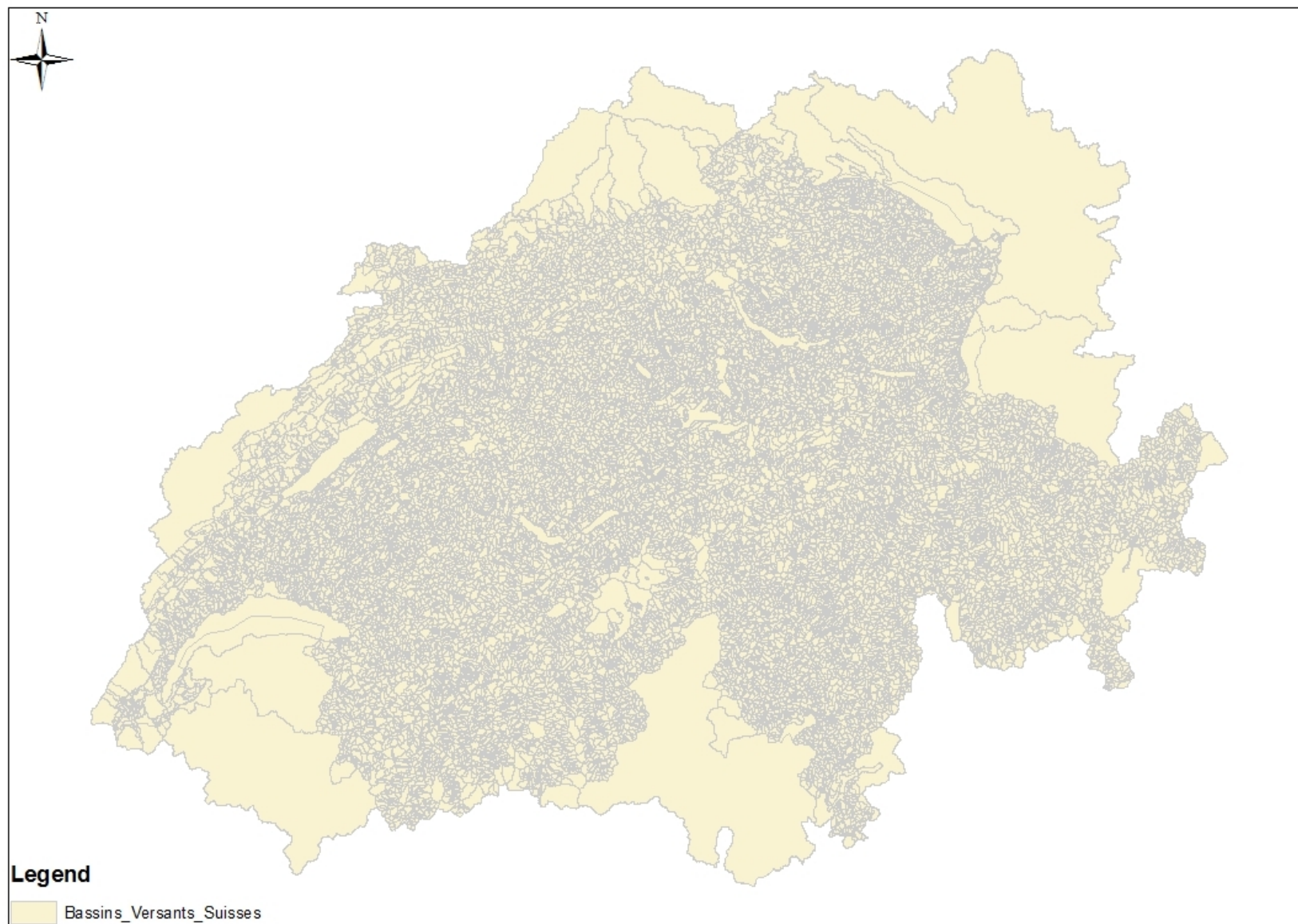
En fonction du nombre de points par type de culture, et en supposant que l'horticulture a le même poids que la culture de plein champs, puis que l'alpage a une contribution négligeable (1%), on obtient la pondération suivante :

	Points	Facteur de pondération (%)
Arboriculture	10,77	44
Viticulture	5,54	23
Plein champs	3,90	16
Horticulture	3,90	16
Alpage	0,25	1
Total	24,36	100

5. Schéma récapitulatif des données SIG disponibles et leur utilisation

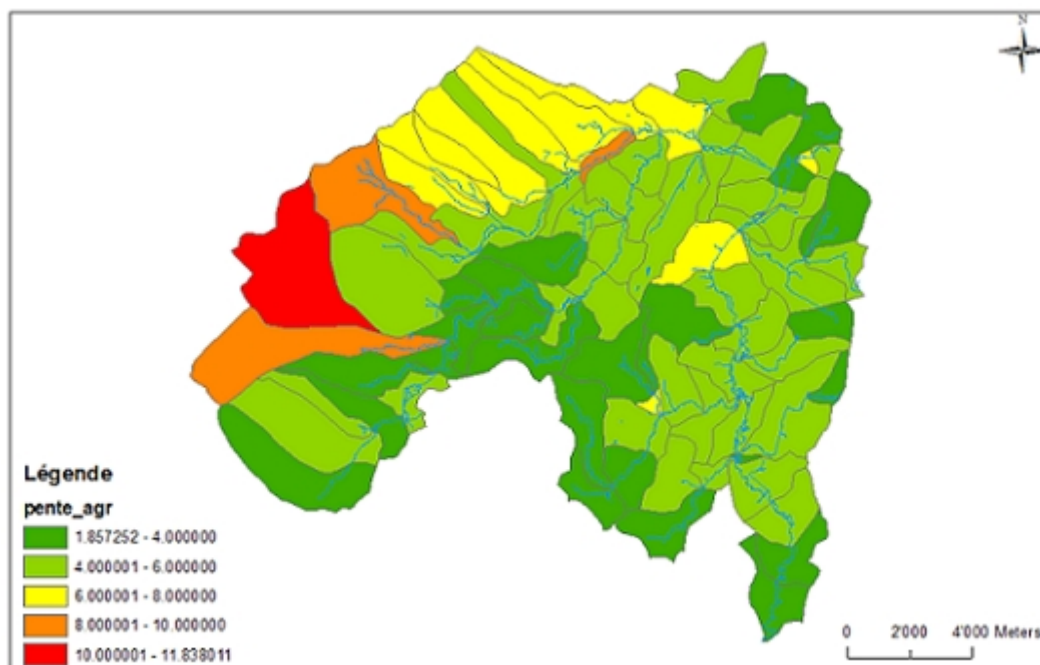


6. 22'433 bassins versant de l'entier du territoire suisse (OFEV)

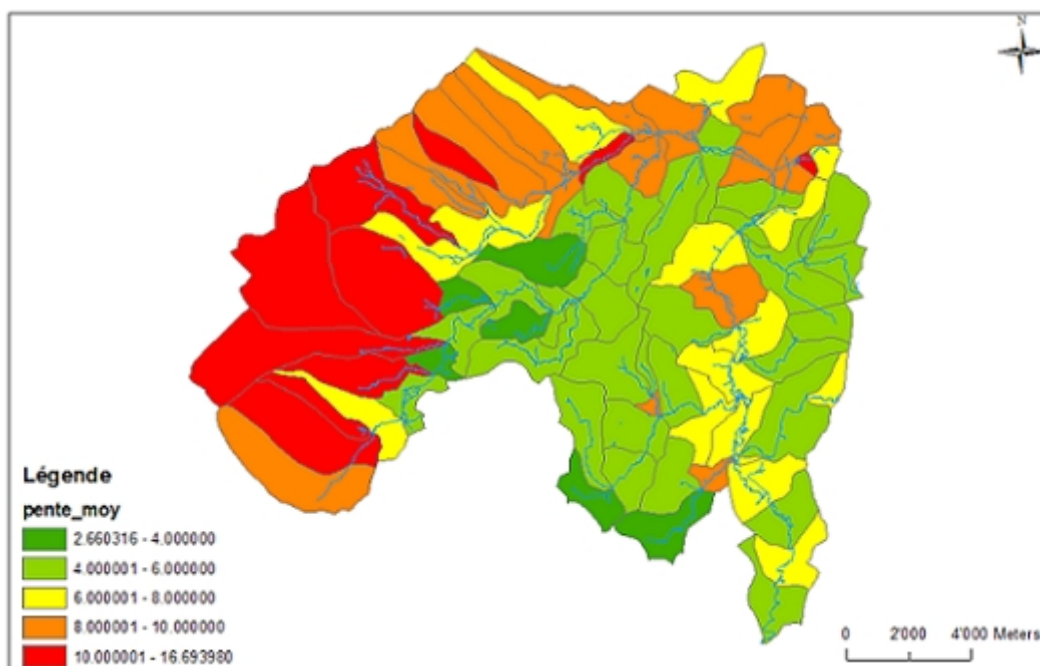


7. Comparaison entre la prise en compte des pentes du bassin versant dans son intégralité et celles des surfaces agricoles

La carte de la pente moyenne des **surfaces agricoles** pour chaque sous bassin versant de la Venoge est la suivante :



La même carte peut être produite, pour cette fois-ci la pente moyenne de **l'ensemble des surfaces** du bassin versant (agricole, constructions, forêts...) :



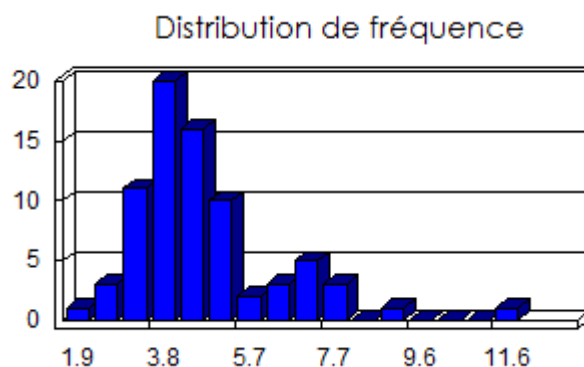
Que l'on choisisse l'un ou l'autre des calculs, le résultat va différer de façon importante. On aura généralement tendance à surestimer la pente si on choisit l'entier du bassin versant. Cette remarque était évidemment intuitive, en pensant par exemple aux régions montagneuses, où

l'agriculture va se faire plus particulièrement sur les surfaces planes, à l'exception parfois des vignes et des alpages. Mais une telle différence pour un bassin versant de plaine tel que celui de la Venoge est plutôt surprenante.

La comparaison des histogrammes peut nous donner plus d'informations :

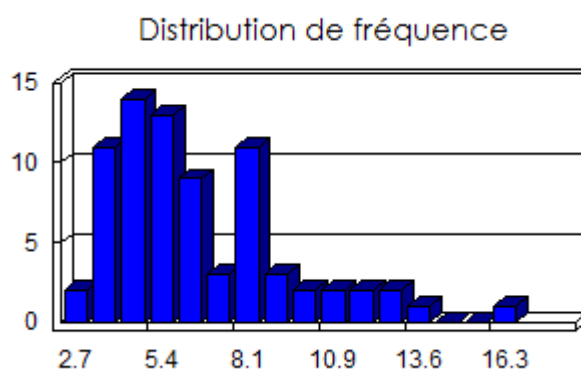
Pentes agricoles :

Minimum	1.857
Maximum	11.838
Somme	373.57
Moyenne	4.915
Ecart type	1.624



Pentes du bassin versant :

Minimum	2.660
Maximum	16.694
Somme	527.15
Moyenne	6.936
Ecart type	2.796



On peut là aussi remarquer la surestimation des pentes lorsque l'on prend en compte toutes les surfaces du bassin versant.

Les pentes agricoles présentent une répartition rappelant une réponse unimodale, tandis que l'historgramme des pentes du bassin versant montre un pic pour des pentes d'environ 8.1, en effet, en observant la carte, on remarque le nombre important de sous bassins de couleur orange. La dispersion est meilleure pour les pentes agricoles : leur écart type est plus faible (33% de la moyenne, contre 40% pour l'ensemble des surfaces).

8. Méthode alternative pour l'évaluation de la composante hydrologique du bassin versant

On s'intéresse ici aux relations entre le débit d'étiage (Q_{347}) du cours d'eau, avec les apports en eau de ruissellement issus des surfaces agricoles.

La démarche générale est reprise de la Directive « protection des eaux lors de l'évacuation des voies de communications ». La différence réside dans le fait que le débit déversé dans le cours d'eau n'est pas celui provenant d'un tronçon de route, mais des surfaces agricoles situées sur le bassin versant d'intérêt. L'idée générale est de déterminer quelle est la contribution des surfaces agricoles par ruissellement par rapport au débit de base du cours d'eau.

Le tableau suivant développe la démarche :

Formules	Symboles	Signification
	Q_E	Débit maximum des surfaces agricoles [m^3/s]
	R	Coefficient de ruissellement moyen du bassin versant [-]
	i	Intensité de pluie moyenne sur le bassin versant [mm]
	A_{agr}	Surfaces agricoles totales du bassin versant [m^2]
	V	Condition de déversement hydraulique
	Q_{347}	Débit du cours d'eau atteint ou dépassé pendant 347 jours par année [m^3/s]
	V_G	Condition de déversement propre au cours d'eau
	f_s, f_G	Facteurs de correction pour la nature du lit et le type de cours d'eau ; cf. valeurs ci-dessous (si les données sont indisponibles, $f_s = f_G = 1$)

Facteurs de correction propres au cours d'eau : f_s, f_G			
Nature du lit	f_s		
Surtout sédiments fins	0.5		(pour $V \geq 1$, $f_s = f_G = 1.0$)
Surtout graviers ($\varnothing < \text{taille du poing}$)	1.0		
Surtout pierres ($\varnothing > \text{taille du poing}$)	1.5		
Surtout blocs ($\varnothing > 0.5 \text{ m}$)	2.0		
Type de cours d'eau	Q_{347} (m^3/s)	Largeur moyenne du lit mouillé (m)	Vitesse moyenne D'écoulement (m/s)
Petit ruisseau du Plateau	< 0.1	< 1	< 0.5
Grand ruisseau du Plateau	0.1 – 1.0	1 - 5	< 0.5
Petit ruisseau des Préalpes	< 0.1	< 1	> 0.5
Grand ruisseau des Préalpes	0.1 – 1.0	1 - 5	> 0.5
Grand cours d'eau	> 1.0	> 5	> 0.5

Exemple d'application :

Les valeurs des Q_{347} ont été reprises de l'Atlas hydrologique de la suisse. Pour la Venoge, on dispose de deux valeurs pour la partie amont et aval du bassin versant, respectivement de 3 et 7 l/s/km².

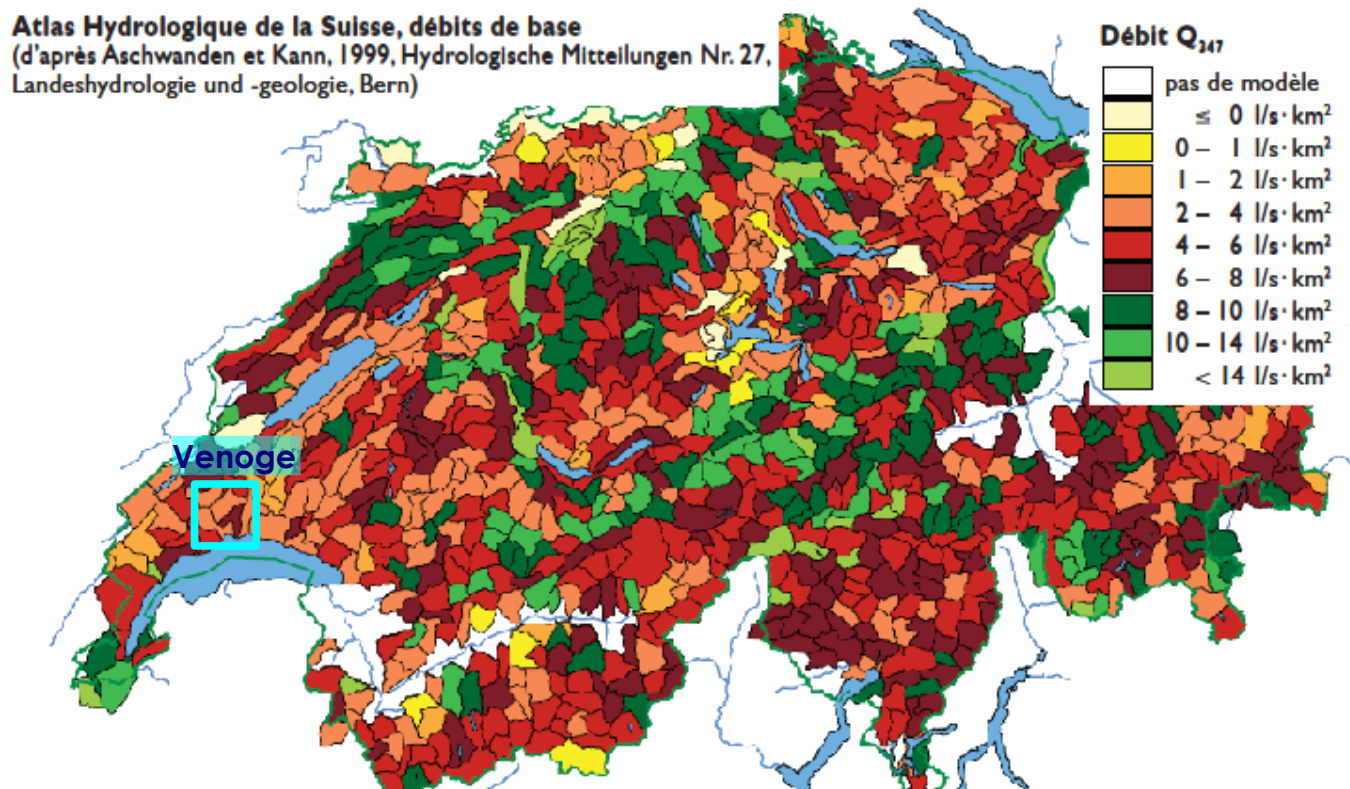


Illustration 23: Q_{347} des bassins versant suisses (Atlas hydrologique de la suisse)

La valeur choisie pour l'intensité est celle pour une durée de pluie de 15 minutes et pour une pluie de temps de retour de 2 ans : on considère un « worst case » en matière de précipitations.

La formule de l'intensité est la suivante : $i = \frac{K}{B+t}$ (Musy, Cours d'hydrologie générale)

avec : i = intensité spécifique moyenne d'une pluie d'une durée de t minutes atteinte ou dépassée en moyenne une fois toutes les T années [l/s/ha]

K : coefficient fonction du lieu et du temps de retour T

B une constante de lieu [min]

Les valeurs de K et B sont fonction des zones d'intensités égales définies pour la Suisse :

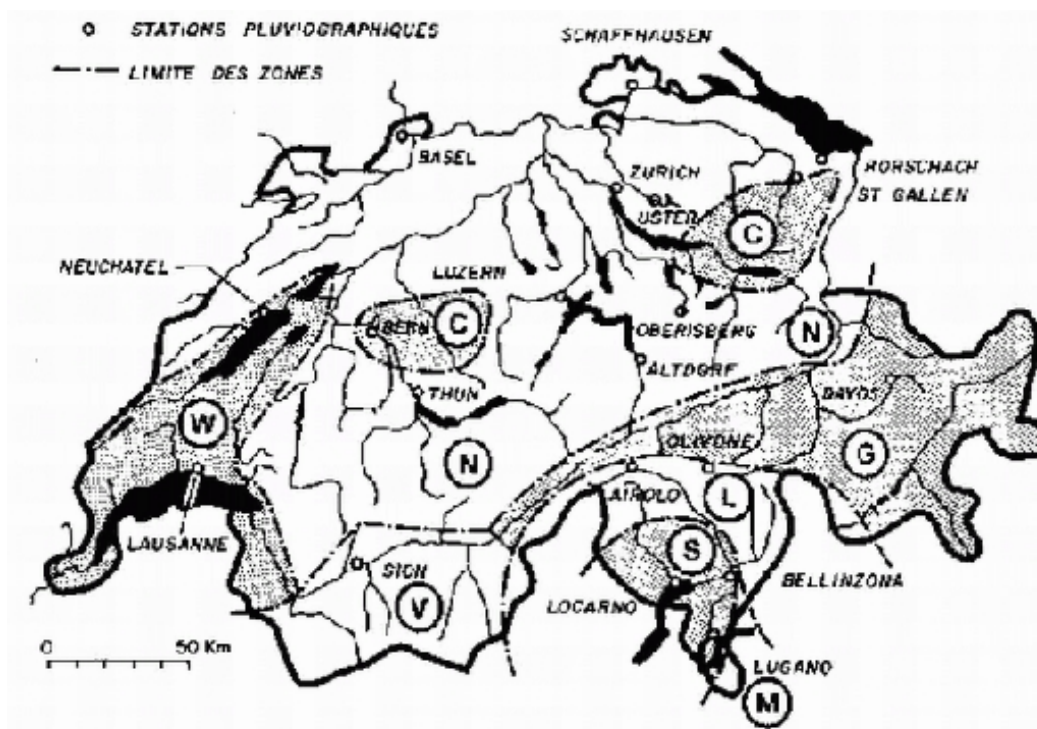


Illustration 24: Délimitation des zones d'intensité égales pour la Suisse (SN 640 350)

L'ensemble de la région lémanique est située en zone W, on retrouve alors les valeurs de B et K d'après le tableau suivant :

		Valeur de K selon le temps de retour compris entre 1 et 20 ans						B
Zone		1	2	5	10	15	20	
Alpes								
Valais	V	1050	1350	1700	2100	2300	2400	6
Grisons	G	1900	2450	3000	3750	4100	4300	10
Nord des Alpes								
Ouest	W	2700	3500	4300	5400	5950	6200	12
Nord-est	N	3400	4400	5400	6750	7450	7750	12
Centre	C	4050	5250	6500	8100	8900	9300	12
Sud des Alpes								
Léventina	L	3400	4400	5400	6750	7450	7750	12
Sotto-Sopra Ceneri	S	6000	7800	9600	12000	13200	13800	25
Mendrisiotto	M	5000	6500	8000	10000	11000	11500	25

Pour la Venoge, l'intensité vaut donc : $i = \frac{K}{B+t} = \frac{3500}{12+15} = 129.6 \text{ L/s/ha}$

En ce qui concerne le coefficient de ruissellement, il a été calculé à partir de la formule suivante : $R = \frac{\sum (R_i A_i)}{A_{tot}}$ avec A_i les différents types de couverture du sol (liés à la couche d'utilisation de sol) et R_i les coefficients de ruissellement typiques pour ces types de couverture. Ils sont détaillés dans le tableau suivant :

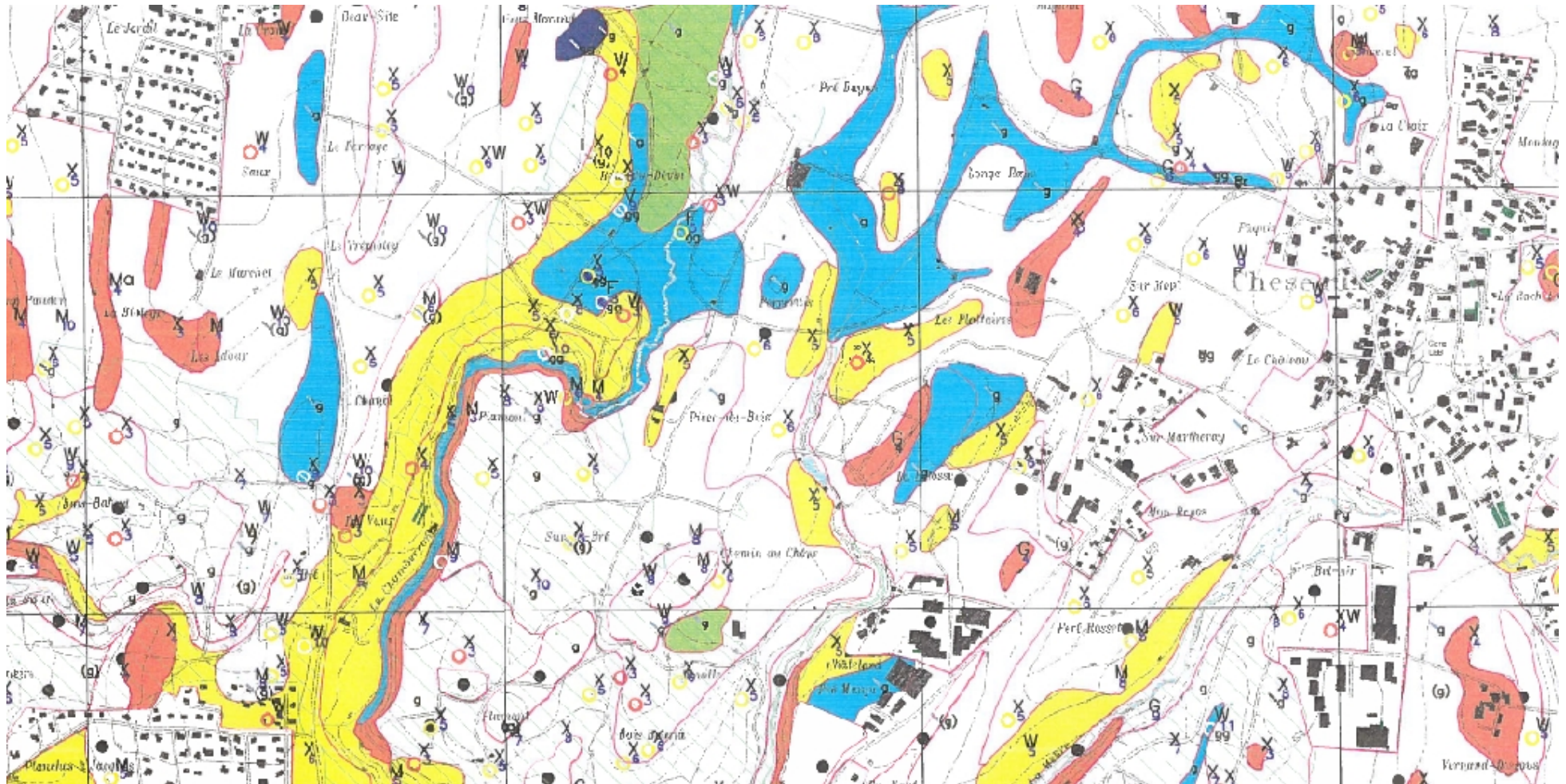
Types de sol	Utilisation du sol (Code)	Coefficients de ruissellement typiques
Urbains	100	0.8
Vignobles	202	0.45
Prairies - alpages	201 – 240	0.1
Horticulture	203	0.3
Plein champs	220	0.15
Forêts	300	0
Surfaces improductives	400	0

Ainsi, pour l'intégralité du bassin versant de la Venoge, on trouve un coefficient de ruissellement moyen de 0.18

Le calcul de la condition de déversement propre au cours d'eau peut ainsi se faire sur chaque sous bassin versant de la Venoge, la pondération à appliquer est la suivante :

Hydrologie du bassin versant		
Conditions de déversement propre au cours d'eau	$V_G > 1$	+ 1 PE
	$V_G \geq 0.1$	+ 4 PE
	$V_G < 0.1$	+ 8 PE

9. Extrait de la carte pédologique du cadastre du canton de Vaud (Michel Gratier, communication personnelle)

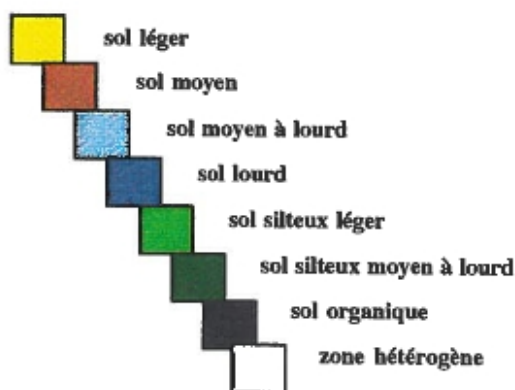


CARTE DES SOLS

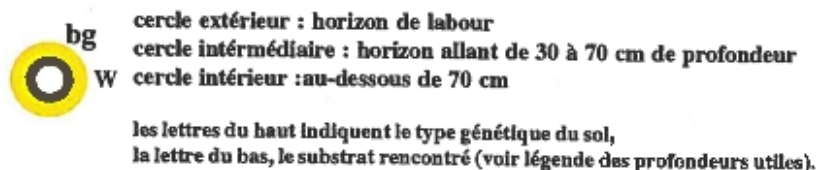
légende pour les textures de surface

Cette carte présente les diverses tendances texturales des sols agricoles et forestiers. On ne peut donc pas déterminer à la seule lecture des unités quel est le taux d'argile ou de sable d'une parcelle. Pour cela, il faut se reporter aux analyses qui ont été faites ponctuellement. Les tendances suffisent toutefois pour apprécier un sol.

couleurs des unités



point sondé présentant les tendances texturales rencontrées à divers niveaux



types génétiques		sous types et intergrades	
f	sol alluvial	fc	sol alluvial carbonaté
v	sol colluvial	vc s	ol colluvial carbonaté
e	sol peu évolué d'érosion	ec	sol d'érosion carbonaté
h(c)	humocalcique	hc	humovcalcaire
rz	rendzine	rb	rendzine brunifiée
b	sol brun	b(c)	brun calcique
		ba	brun acide
		bla	brun lessivé acide
p	podzol		
g	pseudogley	b(g)	brun faiblement hydromorphe
		b(g)	brun calcique hydromorphe
		blg	brun lessivé hydromorphe
Go	gley oxydé	Goc	gley oxydé calcaire
		fGoc	sol alluvial à gley oxydé carbonaté
		f(Go)	sol alluvial à hydromorphie de profondeur (> 60 cm)
G	gley	G(e)	gley calcique
		Gt	gley tourbeux
		t(c)	tourbe calcique
t	sol tourbeux		
		lt	sol lithocalcique
		rbh	rendzine brunifiée humifère
		bc	brun calcaire
		bl	brun lessivé
		b(G)	sol brun faiblement gleyifié
		te	tourbe eutrophe

10. Tableaux des résultats de la classification des bassins versant de la Chamberonne et de la Venoge

a. Résultats de la classification de l'activité agricole

VENOGE

Facteur d'application Critère d'évaluation Points				Données Venoge
Surface agricole				
Type de culture [% du bassin versant] (Pondération selon substances appliquées, classement SIRIS)	201 – Arboriculture	PE = % BV * 0.44	0,38	0,87
	202 – Viticulture	PE = % BV * 0.23	0,08	0,33
	203 – Horticulture	PE = % BV * 0.16	0,03	0,18
	220 – Cultures fourragères et de plein champs	PE = % BV * 0.16	8,58	53,65
	240 – Alpage	PE = % BV * 0.01	0,05	4,87
Somme			9,12	
Surface agricole drainée				
Part de la SAU drainée [%] SAU = surfaces agricoles sans alpages!	< 5	+0 PE	+0 PE	0
	Entre 5 et 20	+2 PE	+0 PE	0
	> 20	+4 PE	+4 PE	1
Mesure de protection				
Installation de lavage des pulvérisateurs		-2 PE	0 PE	0
Protection naturelle du cours d'eau				
Ripisylve : > 50 % de surface de forêt 50m autour du cours d'eau		-3 PE	-3 PE	1
Surface bande enherbée présente autour du cours d'eau		-1 PE	0 PE	0
Somme =			10,12	
Classement de l'activité				
Faible		< 10		
Moyenne		10 – 15		
Élevée		> 15		

Selon ce classement, lorsque l'on prend en compte l'intégralité du bassin versant de la Venoge, son bassin versant présente une activité agricole **Moyenne**.

CHAMBERONNE

Facteur d'application Critère d'évaluation Points				Données Chamberonne
Surface agricole				
Type de culture [% du bassin versant] (Pondération selon substances appliquées, classement SIRIS)	201 – Arboriculture	PE = % BV * 0.44	0,36	0,81
	202 – Viticulture	PE = % BV * 0.23	0,01	0,05
	203 – Horticulture	PE = % BV * 0.16	0,19	1,16
	220 – Cultures fourragères et de plein champs	PE = % BV * 0.16	6,80	42,49
	240 – Alpage	PE = % BV * 0.01	0,00	0,00
Somme			7,35	
Surface agricole drainée				
Part de la SAU drainée [%] SAU = surfaces agricoles sans alpages!	< 5	+0 PE	+0 PE	0
	Entre 5 et 20	+2 PE	+0 PE	0
	> 20	+4 PE	+4 PE	1
Mesure de protection				
Installation de lavage des pulvérisateurs		-2 PE	0 PE	0
Protection naturelle du cours d'eau				
Ripisylve : > 50 % de surface de forêt 50m autour du cours d'eau		-3 PE	0 PE	0
Surface bande enherbée présente autour du cours d'eau		-1 PE	0 PE	0
Somme =			11,35	
Classement de l'activité				
Faible		< 10		
Moyenne		10 – 15		
Élevée		> 15		

En ce qui concerne la Chamberonne, lorsque l'on prend en compte l'intégralité du bassin versant, l'activité agricole est qualifiée, comme pour la Venoge, de **Moyenne**.

*b. Résultats de la classification de la vulnérabilité du bassin versant***VENOGE**

Paramètre	Critère d'évaluation	Points	Données Venoge
Topographie			
Pente moyenne des parcelles agricoles [%]	< 1	+0 PE	0
	Entre 1 et 5	+2 PE	1
	Entre 5 et 10	+4 PE	0
	> 10	+8 PE	0
Caractéristiques du Bassin versant			
Densité du réseau hydraulique [km cours d'eau/km ² de bassin versant]	< 0,8	+1 PE	0
	Entre 0,8 et 1,15	+2 PE	1
	> 1,15	+4 PE	0
Coefficient de compacité : K de gravelius	< 1,75	+1 PE	0
	> 1,75	+2 PE	1
Hydrologie du Bassin versant			
Fast Flow Index	FFI < 0,35	+1 PE	0
	0,35 < FFI < 0,50	+2 PE	0
	FFI > 0,50	+4 PE	1
Ressource en eau potable			
Importance particulière en matière d'approvisionnement en eau potable		+2 PE	0
		Somme =	10
Classement			
Faible		≤ 8	
Moyenne		8 – 12	
Élevée		> 12	

En ce qui concerne la vulnérabilité du bassin versant, la Venoge est de classe **Moyenne**.

CHAMBERONNE

Paramètre	Critère d'évaluation	Points	Données Chamb.
Topographie			
Pente moyenne des parcelles agricoles [%]	< 1	+0 PE	0
	Entre 1 et 5	+2 PE	1
	Entre 5 et 10	+4 PE	0
	> 10	+8 PE	0
Caractéristiques du Bassin versant			
Densité du réseau hydraulique [km cours d'eau/km ² de bassin versant]	< 0,8	+1 PE	0
	Entre 0,8 et 1,15	+2 PE	0
	> 1,15	+4 PE	1
Coefficient de compacité : K de gravelius	< 1,75	+1 PE	1
	> 1,75	+2 PE	0
Hydrologie du Bassin versant			
Fast Flow Index	FFI < 0,35	+1 PE	1
	0,35 < FFI < 0,50	+2 PE	0
	FFI > 0,50	+4 PE	0
Ressource en eau potable			
Importance particulière en matière d'approvisionnement en eau potable		+2 PE	0
Somme =		8	
Classement			
Faible		≤ 8	
Moyenne		8 – 12	
Élevée		> 12	

La Chamberonne quant à elle présente une vulnérabilité du bassin versant **Faible**.